

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

Diego Cecagno
(Dissertação de Mestrado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

DIEGO CECAGNO

Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil

Julho de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

CECAGNO, DIEGO

CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA / DIEGO CECAGNO. -- 2015.
70 f.

Orientador: IBANOR ANGHINONI.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2015.

1. matéria orgânica. 2. sequestro de carbono. 3.
modelo de predição. 4. integração lavoura-pecuária. 5.
intensidades de pastejo. I. ANGHINONI, IBANOR,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DIEGO CECAGNO

CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em
Ciência do Solo.

Aprovada em 24 de julho de 2015
Homologado em 29 de setembro de 2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Cimélio Bayer
UFRGS

Prof. Thomé Lovato
UFSM

Prof. Frederico Costa Beber Vieira
UNIPAMPA

Orientador - Prof. Ibanor Anghinoni
UFRGS

*Dedico este trabalho a quem
dedicou a vida por mim.*

*Meus pais: **João e Helena***

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ibanor, por esses seis anos de orientação, desde a iniciação científica, sendo um exemplo na vida pessoal e profissional: um modelo a ser seguido.

Ao Adão, “meu amigo João Luis”, por ser quase um pai para a gurizada, tanto em laboratório como no campo. Sem dúvida, foi uma pessoa fundamental para que esse trabalho viesse a ser concluído.

Aos funcionários públicos, que são facilitadores nas atividades realizadas pelos alunos e, em especial, ao Seu Zé, ao Jader e ao Tonho.

Ao Sérgio, por toda a amizade e companheirismo. Foi em meio a muito mate, viagens e descontração que passei a gostar do que faço e me motivar a seguir na pós-graduação. Graças à você, Sérgio, iniciei e pude terminar mais essa etapa da vida. E que venha a próxima!

À equipe de Química e Fertilidade do Solo, pelos muitos colegas e amigos que fiz. Agradeço à Amanda, Bernardo, Arnuti, Fabrício, João, Tiago, e aos bolsistas de iniciação científica Denardin, João Cadore, Sarah, Fernanda, Dânia, Rodrigo, Gabriela e Walker, com quem tive o prazer de trabalhar.

Ao João Paulo Cassol Flores, por toda a boa vontade, me apoiando nessa busca pelo conhecimento.

Ao pessoal do grupo de pesquisa em manejo do solo, por todas as conversas produtivas e, em especial, ao Murilo e Cecília, por todo o apoio.

Ao pessoal do Departamento de Plantas Forrageiras, os quais são parte fundamental no Grupo de Pesquisa em Integração Lavoura-Pecuária. Em especial, ao professor Paulo Carvalho, Taise, Thiago, Willian e Raquel.

Ao “Grupo de topo”, por serem sempre um porto seguro na minha vida. Amizade duradoura e verdadeira.

Às pessoas que me motivaram nessa jornada. Sem dúvida, Priscila, Eduardo e Jefferson, essa caminhada teria sido penosa sem vocês.

Aos colegas e professores, por todos os ensinamentos, que muito contribuíram na minha formação pessoal e profissional.

À minha família, por compreender minha ausência, por me apoiar em todos os momentos, e sempre me incentivar a conseguir o que almejo.

A todos vocês que permitiram que esse sonho se realizasse, meu muito obrigado!

CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA¹

Autor: Eng^o. Agr^o. Diego Cecagno

Orientador: Prof. Dr. Ibanor Anghinoni

RESUMO

Mudanças no uso da terra acarretam em modificações no balanço de carbono do solo, podendo elas ser positivas ou negativas. Sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), em plantio direto, podem vir a ser alternativas de uso conservacionista do solo. Nesse sentido, os objetivos deste estudo foram estimar os parâmetros da dinâmica da matéria orgânica do solo e utilizá-los nas previsões e simulações a respeito do sequestro de carbono no solo. O estudo foi desenvolvido em um experimento em execução desde 2001 no município de São Miguel das Missões, no Sul do Brasil. Os tratamentos avaliados consistiram de diferentes intensidades de pastejo, reguladas pela altura de manejo do pasto (10, 20, 30 e 40 cm), além de áreas sem pastejo, em delineamento experimental de blocos completos ao acaso, com três repetições. O solo foi coletado (0-20 cm) após a colheita da soja (maio de 2014), juntamente com a área de mata nativa. Os valores dos coeficientes de humificação (K_1) e de perda da matéria orgânica (K_2) foram obtidos a partir da relação entre adição de carbono e os estoques de carbono orgânico (CO) do solo, com o uso de um modelo unicompartimental de previsão. Os estoques de CO apresentaram entre 52 e 55 Mg ha⁻¹, não diferindo entre os tratamentos. Os coeficientes K_1 e K_2 apresentaram valores de 0,18 e 0,011 ano⁻¹. A quantidade de carbono que deve ser aportada anualmente para manter os estoques de CO é de 3,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. O sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte em plantio direto apresenta balanço positivo de carbono, independentemente da altura de manejo de pasto adotado ao longo do inverno, em um Latossolo oxidico no subtropical. Previsões indicam que os sistemas mais intensivos de pastejo (10 e 20 cm) não conseguem chegar aos estoques de carbono orgânico da mata nativa ao longo do tempo, enquanto os sistemas de pastejo com intensidade moderada (30 e 40 cm) e sem pastejo apresentam potencial de sequestro de carbono suficiente para se igualar à mata nativa, desde que os coeficientes de humificação e de perda da matéria orgânica do solo não mudem com o passar do tempo.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (59 p.) Julho, 2015. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e da CAPES.

SOIL ORGANIC CARBON IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM ¹

Author: Agron. Diego Cecagno

Adviser: Prof. PhD. Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

Changes in land use lead to changes in soil carbon balance, which can be positive or negative. Integrated crop-livestock systems (ICLS) under no-till may be an alternative regarding conservation soil management. In this sense, the objectives of this study were to estimate the parameters of the soil organic matter dynamics and use them in simulations and predictions about soil carbon sequestration. This study was conducted in an experiment established in 2001 at São Miguel das Missões County, in Southern Brazil. The treatments consisted of different grazing intensities, regulated by the pasture sward height (10, 20, 30 and 40 cm), and no grazing areas in an experimental design of randomized block design, with three replicates. The soil sampling (0-20 cm) occurred after soybean harvest (2014 May) in the experimental plots, and in a native forest area. The humification (K_1) and loss of organic matter coefficients (K_2) were obtained from the relationship between the carbon addition and soil organic carbon (SOC) stocks, using a one-compartment prediction model. There was no difference in SOC among treatments and they were between 52 and 55 Mg ha⁻¹. The K_1 and K_2 coefficients value were 0.18 and 0.011 yr⁻¹. The amount of carbon that must be added annually to maintain the SOC stocks is 3.15 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The integrated soybean production under no-tillage and beef cattle system presents a positive carbon balance, regardless of grazing intensity adopted during the winter season, in an oxidic Oxisol in the subtropics. Predictions indicate that the most intensive grazing systems (10 and 20 cm) cannot reach the soil organic carbon stocks of native forest area over time, while moderate grazing systems (30 to 40 cm) and no grazing areas have enough potential for carbon sequestration to reach the native forest area, since the coefficients of humification and loss of organic matter does not change over time.

¹ M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (59 p.) July, 2015. Research supported by CNPq and CAPES.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO.....	3
2.1. Sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no subtrópico brasileiro.....	3
2.2. Acúmulo e dinâmica de carbono e nitrogênio no solo.....	6
2.3. Dinâmica da matéria orgânica do solo.....	9
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico do experimento.....	13
4.2. Tratamentos e delineamento experimental.....	15
4.3. Condução do experimento.....	15
4.4. Adubação e calagem.....	16
4.5. Etapa referente a presente pesquisa.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1. Acúmulo de carbono no solo.....	22
5.2. Dinâmica e predição do acúmulo de carbono no solo.....	27
6. CONCLUSÕES	41
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
9. APÊNDICES	57
10. ANEXO.....	59

RELAÇÃO DE TABELAS

- Tabela 1.** Teores de carbono orgânico e nitrogênio, e relação C/N, no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto ...22
- Tabela 2.** Adição anual de C, estoques de carbono orgânico (CO) inicial (C_0), observado e estimado por regressão linear, em um sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto.....28
- Tabela 3.** Análises de falta de ajuste (LOFIT) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para avaliar a acurácia da simulação realizada pelo modelo unicompartimental utilizando os coeficientes K_1 e K_2 em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto.....29
- Tabela 4.** Taxa de sequestro de carbono em relação à quantidade de carbono adicionada anualmente em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto33
- Tabela 5.** Predição do acúmulo da matéria orgânica do solo pelo modelo unicompartimental em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto.....34

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação ao longo da condução do experimento, juntamente com a precipitação anual normal (a), e precipitação mensal normal, temperaturas máximas, médias e mínimas mensais normais (b), em São Miguel das Missões/RS.....14
- Figura 2.** Vista geral da área experimental, com distribuição dos tratamentos de intensidade de pastejo (2001). Fazenda do Espinilho, São Miguel das Missões/RS.....15
- Figura 3.** Representação esquemática da relação entre o estoque de carbono orgânico (CO) no tempo t e a adição anual (A) em um determinado sistema de cultivo. A equação linear $C_t = a + bA$ é equivalente ao modelo $C_t = C_0e^{-k_2t} + K_1A/K_2 (1 - e^{-k_2t})$. A_{C_0} : adição anual de carbono requerido para manter C_0 . A' : adição de carbono pela cultura e a respectiva contribuição ($C_{cultura}$) no estoque de CO.....19
- Figura 4.** Estoques de carbono orgânico (CO) na camada 0-20 cm do solo no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto (SP = sem pastejo; Mata = referência).....25
- Figura 5.** Relação entre os estoques de carbono orgânico (CO) e a adição anual de carbono ao solo em sistema integrado de produção soja-gado de corte em plantio direto.28
- Figura 6.** Relação entre os estoques de carbono orgânico (CO) estimados pelo modelo unicompartmental e os estoques de CO observados, na camada de 0-20 cm do solo após 13 anos do sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto.29
- Figura 7.** Evolução do estoque de carbono orgânico (CO) predito pelo modelo unicompartmental ao longo do tempo em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto.....36
- Figura 8.** Simulação dos estoques de C original, C adquirido e C total, no período de 62 anos a partir do início do experimento em 2001, em um sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto.....38

1. INTRODUÇÃO

O plantio direto foi introduzido no Brasil na década de 1970, a fim de reduzir problemas com erosão do solo que assolavam lavouras de todo o país. Este sistema se baseia em três princípios básicos, os quais são: o alto aporte de resíduos, o não revolvimento do solo e a rotação de culturas (Heckler & Salton, 2002). Do ponto de vista da conservação do solo, Mielniczuk (1988) define como “sistema de manejo conservacionista”, aquele que proporciona: (1) boa cobertura do solo durante o ano, seja por plantas ou seus resíduos; (2) aporte contínuo e abundante de resíduos vegetais para compensar a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e dos resíduos vegetais e, (3) mínimo revolvimento do solo, permitindo que os resíduos permaneçam na superfície e sejam preservados da oxidação microbiana. Além dessas características, também se pode acrescentar a diversificação de culturas (Friedrich et al., 2012).

No entanto, o plantio direto como prática isolada não garante o manejo conservacionista do solo, visto que os sistemas agrícolas na região Sul do Brasil tem se mostrado ineficientes, devido ao alto risco associado à atividade. Atualmente, são cultivados, nessa região, 16,5 milhões de ha em plantio direto no verão, e apenas 2,4 milhões de ha no inverno (CONAB, 2014). Além de serem produzidos grãos com alto risco, devido à instabilidade climática e de mercado, ainda ficam 14,1 milhões de ha em pousio ou com culturas de cobertura, sem gerar renda direta ao produtor. Nesse contexto, a inserção do animal pode ser uma fonte de renda mais segura ao produtor nesse período do ano em que a área fica ociosa.

Assim sendo, o uso alternado ao longo do ano entre pecuária e lavoura, em plantio direto, pode resultar em ganhos econômicos e ambientais, uma vez que a agricultura conservacionista é potencializada pela diversidade do sistema integrado, onde se criam novas rotas de ciclagem de nutrientes e novos processos ecossistêmicos emergem (Anghinoni et al., 2013).

O sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) possui um impacto distinto no solo, em virtude de o animal ser um catalisador dos processos que ocorrem no mesmo. As alterações provocadas pelos bovinos são passíveis de serem mensuradas no solo, pois este funciona como a memória do sistema solo-planta-animal-atmosfera (Carvalho et al., 2011).

O solo tem uma grande importância ecossistêmica, podendo atuar como fonte ou dreno do carbono (C) atmosférico. Quando o seu balanço no solo é positivo, ou seja, há mais entradas de C do que saídas, o solo funciona como dreno de C, mitigando a presença de gases de efeito estufa na atmosfera (Nicoloso et al., 2008). Além do benefício ambiental, também há a melhoria na capacidade produtiva do solo. Esta melhoria é oriunda das propriedades emergentes do ciclo do C, tais como o aumento na infiltração e manutenção de água no solo e redução de temperatura, entre outros (Lovato et al., 2004). Essas propriedades são ocasionadas por processos que ocorrem ao longo do tempo. Sá (2005) ressalta que o sistema de plantio direto demora até 20 anos para se consolidar, ou seja, passar da fase de implantação para a de manutenção. No entanto, em SIPAs, os efeitos na qualidade do solo são muito mais rápidos, pois oito anos de SIPA proporcionaram qualidade de solo similar a 23 anos de sistema plantio direto (SPD), na região do Cerrado (Silva et al., 2011a).

Compreender como ocorre a evolução dos estoques de carbono orgânico (CO) ao longo do tempo é de suma importância na escolha de sistemas de manejo sustentáveis, a fim de fazer um uso intensivo do solo de modo a preservá-lo para as futuras gerações. Dessa forma, o presente trabalho objetiva avaliar a evolução dos estoques de carbono orgânico em sistema de integração soja-bovinos de corte de longa duração, no sistema plantio direto.

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

O solo, do ponto de vista da termodinâmica, é um sistema aberto, que troca energia e matéria com o ambiente. Nele, atuam processos dissipativos e de ordenação. Quanto mais matéria (resíduos) for adicionada ao solo, maiores serão os processos de ordenação que irão ocorrer no sistema, levando-o à auto-organização (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Sendo assim, a matéria orgânica é um indicador de qualidade do solo, desempenhando papel fundamental na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Boddey et al., 2010). Procura-se, então, demonstrar a importância dos sistemas integrados de produção agropecuária em plantio direto para a produção sustentável de alimentos. Neste contexto, serão abordados, nesta revisão, aspectos que envolvem a dinâmica da matéria orgânica do solo, desde seu acúmulo até sua evolução ao longo do tempo.

2.1. Sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no subtropical brasileiro

Nos anos de 1950 e 1960, os imigrantes europeus iniciaram a abertura de áreas para produção agrícola intensiva nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e sudoeste do Paraná. O modelo tecnológico empregado era o mesmo que fora utilizado em suas terras de origem, baseando-se no uso de arado e grades, precedidas por queimadas do resíduo para facilitar o trabalho das máquinas (Casão Júnior et al., 2008). Esta prática

era necessária nas regiões temperadas e frias para aumentar a temperatura do solo e propiciar um ambiente favorável à germinação das sementes.

Juntamente com o preparo convencional do solo, houve uma rápida expansão da fronteira agrícola no sul do país, passando de 800 mil hectares cultivados em 1969 para quatro milhões em 1977. O uso continuado deste sistema de produção determinava perdas de até dez toneladas de solo por tonelada de grão produzido (Amado & Eltz, 2003).

Porém, na década de 1980, este cenário começou a mudar. Com o advento do SPD, os problemas de erosão de solo reduziram significativamente. Com o tempo, percebeu-se uma série de vantagens oriundas desse sistema, como o aumento nos teores de MOS, infiltração de água, agregação e redução da temperatura do solo, menor custo de operação, etc. (Fidelis et al., 2003; Furlani et al., 2008; Choudhury et al., 2014). O SPD, comparativamente ao preparo convencional, preserva a MOS, principalmente por reduzir a sua taxa de decomposição e, quando adequadamente adotado (incluindo a rotação de culturas), por promover uma maior entrada de resíduos no sistema (Amado & Bayer, 2008).

No entanto, no Sul do Brasil, esses sistemas agrícolas tem se mostrado ineficientes ao longo dos anos, devido ao alto risco associado à atividade, pelas condições climáticas favoráveis às doenças fúngicas. Atualmente, são cultivados 16,5 milhões de hectares no verão nessa região, e apenas 2,4 milhões de hectares no inverno (CONAB, 2014). Assim, além de serem produzidos grãos com alto risco no período hibernar (Pereira et al., 2007), ainda ficam 14,1 milhões de hectares em pousio ou com culturas de cobertura, sem gerar renda direta ao produtor. Nesse contexto, a inserção do animal pode ser uma fonte de renda ao produtor nesse período do ano em que a área fica ociosa. Além disso, a diversificação de produtos dentro da propriedade rural também reduz os riscos associados a essas atividades (Rathmann et al., 2008).

Os SIPAs podem ser definidos como sistemas onde há alternância temporária ou rotação do cultivo de grãos e pastejo de animais na mesma área, ao longo do tempo (Moraes et al., 2014). Estes sistemas já vêm sendo utilizados em mais de 2,5 bilhões de hectares pelo mundo (Bell & Moore, 2012) e visam obter o sinergismo do sistema de rotação de culturas utilizado

(Carvalho et al., 2011). É uma tecnologia antiga que tem tomado força em todo o mundo, devido a vantagens em relação ao uso isolado dos sistemas agrícolas e pecuários (Balbinot Júnior et al., 2009). Ao incluir ciclos de cultivos de forrageiras no sistema de rotação de culturas, os SIPAs aumentam a quantidade de resíduos aportados ao SPD e, em consequência, aumentam a MOS (Roscoe et al., 2006). O uso alternado ao longo do ano de lavoura e pecuária modifica o sistema solo, em virtude de o animal ser um catalisador dos processos que ocorrem no mesmo (Anghinoni et al., 2013).

Assim, os SIPAs, com intensidade moderada de pastejo, podem aumentar a MOS até níveis iguais (ou superiores) à vegetação nativa (Salton et al., 2011), pois o pastejo estimula o crescimento de raízes, comparativamente ao não pastejo de plantas forrageiras (Souza et al., 2009; Shi et al., 2013). O pastejo intenso, por sua vez, resulta em menores quantidades de resíduos aportados ao solo, o que também compromete o acúmulo de carbono ao solo (Assmann et al., 2014).

A pecuária é vista com receio pelos produtores de grãos por possíveis efeitos negativos que os animais provocariam nas culturas de verão, por compactação superficial do solo e pela menor quantidade de resíduos depositados sobre a sua superfície ao término do período hibernar (Carvalho et al., 2011). Apesar disso, diversos trabalhos demonstram que os SIPAs não acarretam em prejuízos ao produtor, quando feito o correto ajuste de carga animal (Moraes et al., 2014), seja no tocante a aspectos econômicos e produtivos (Lunardi et al., 2008; Lopes et al., 2009; Martha Júnior et al., 2011; Martins et al., 2014a) ou nos atributos físicos (Conte et al., 2008; Moreira et al., 2012; Costa, 2014), químicos (Flores et al., 2008; Ferreira et al., 2009; Martins et al., 2014b), biológicos (Souza et al., 2010a; Chávez et al., 2011; Silva et al., 2011b) e de qualidade do solo (Nicoloso et al., 2008; Souza et al., 2010b; Assmann et al., 2014).

Os SIPAs podem resultar em ganhos econômicos e ambientais, uma vez que a agricultura conservacionista é potencializada pela diversidade do sistema integrado. Esses sistemas estão entre as estratégias mundiais (Herrero et al., 2010) e nacionais (Gouvello, 2010) para produção de alimentos com baixa emissão de gases de efeito estufa.

2.2. Acúmulo e dinâmica de carbono e nitrogênio no solo

A matéria orgânica tem grande importância na qualidade química, física e biológica do solo (Silva & Resck, 1997), constituindo-se num componente fundamental do potencial produtivo do solo. Seu teor no solo varia de 0,1% em solos de deserto até mais de 50% em Organossolos (Brun, 2008). A presença de matéria orgânica nos solos é de grande importância, uma vez que é o principal agente gerador de cargas elétricas negativas em solos já formados. Em solos tropicais e subtropicais, a matéria orgânica rege a capacidade do solo em reter, complexar e disponibilizar nutrientes para as plantas, além de ser responsável por cerca de 70% da CTC desses solos de carga variável (Pavan et al., 1985). É responsável pela retenção de nutrientes e água, pela agregação do solo, além de servir de substrato e contribuir para a manutenção da diversidade biológica do solo (Silva et al., 2004). Não obstante, influencia diretamente os fluxos de gases e líquidos no solo (Bayer & Mielniczuk, 2008), além de modificar sua estrutura (Conceição et al., 2005). Sua dinâmica é controlada pelo aporte de resíduos, tipo de solo e seu preparo, temperatura e umidade (Jastrow & Miller, 1997).

Dentre os compostos que compõe a matéria orgânica, o CO é o elemento predominante, correspondendo a 58%, em base de massa (EMBRAPA, 2011). Estima-se que 5% do C terrestre esteja contido no solo, totalizando cerca de 2.500 Pg (petagrama = 10^{15} g) (IPCC, 2000; Lal, 2004). Essa quantidade é pequena, quando comparada aos 38.000 Pg contidos na hidrosfera, mas tem um potencial de mudança muito maior. Sendo assim, o solo se destaca no ciclo do C como o principal compartimento terrestre, armazenando de duas a cinco vezes mais C do que a atmosfera (Eswaran et al., 1993; Stevenson, 1994).

O C e o nitrogênio (N) possuem uma estreita associação, onde ambos passam por ciclos de acoplamento e desacoplamento. Quando o N é absorvido pelas raízes é acoplado ao C em uma alta relação C/N. O desacoplamento ocorre na decomposição dos resíduos, pela redução da relação C/N, ao tornar-se mais próxima à dos microrganismos (Soussana & Lemaire, 2014). Os SIPAs, ao inserirem o animal no sistema, aumentam a ciclagem e reciclagem do N, por aumentarem os ciclos de acoplamento e

desacoplamento (Soussana & Lemaire, 2014). Essa maior reciclagem de N irá proporcionar um uso mais eficiente desse nutriente. O pastejo irá aumentar o desacoplamento, visto que cerca de 80% do N excretado pelo animal retorna ao solo via urina, e apenas 20% permanece acoplado ao C que é excretado via fezes (Soussana & Lemaire, 2014).

Em solos em condição natural, os estoques de C estão estáveis, mantendo-se inalterados, em um equilíbrio dinâmico (Brun, 2008). No entanto, com o cultivo agrícola, a taxa de perda de carbono usualmente é maior do que a de acúmulo (Soussana et al., 2004). Fatores como distúrbio do solo, degradação da vegetação, fogo, erosão, escassez de nutrientes e déficit hídrico podem levar a uma rápida perda de CO do solo (Soussana & Lemaire, 2014). Em condições de clima tropical e subtropical, devido à alta temperatura e umidade, o acúmulo de carbono é ainda mais dificultado. Com o preparo convencional do solo, os estoques de CO diminuem drasticamente. De acordo com Van Wambeke (1992), nos trópicos, onde há maior amplitude térmica e hídrica no solo, a decomposição da MOS é mais rápida do que em regiões de clima temperado.

A temperatura afeta diretamente a taxa de decomposição dos resíduos (e da MOS). De acordo com a lei de Van't Hoff, a cada 10 °C de aumento na temperatura, a velocidade das reações químicas duplica (Feltre, 2004). Embora de uma forma simplista, essa lei ajuda a explicar o motivo de reduzir o conteúdo de MOS no solo com o aumento da temperatura. No entanto, no tocante a processos biológicos, não há essa linearidade. A temperatura aumenta a taxa dos processos biológicos até 30 °C, a partir da qual começa a decrescer rapidamente, não havendo crescimento de fungos e bactérias a partir de 45 e 50 °C, respectivamente (Bárbacenas-Moreno et al., 2009).

O sistema de preparo convencional do solo interfere em três processos, os quais afetam os fluxos de C no sistema solo-planta-atmosfera. O primeiro processo é a mineralização da MOS, que afeta o fluxo de emissão de C do solo para a atmosfera. O segundo, é a queima de combustíveis fósseis durante as operações de preparo, que afeta o fluxo de emissão de C da litosfera para a atmosfera. Por fim, o terceiro processo é a erosão, que atua no fluxo de C do solo para a hidrosfera (IPCC, 2000; Lal, 2004).

O preparo convencional do solo foi trazido da Europa, onde o clima frio reduz a decomposição de matéria orgânica. Para manter os estoques de CO no sul do Brasil, é necessário que se adicione $8,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C sob esse preparo do solo, enquanto essa quantidade cai para $4,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C em plantio direto (Mielniczuk et al., 2003). Em clima temperado, mesmo com preparo convencional, é necessário aportar apenas $1,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C para manter os estoques em um estado estável (Paustian et al., 1992).

Para conseguir aportar ao solo a quantidade de resíduos necessária para manter estáveis os estoques de CO do solo ou, mesmo, sequestrar carbono, é necessário que se faça uso de culturas que produzam grande quantidade de biomassa, para que o seu aporte seja maior do que as perdas por oxidação microbiana, erosão e lixiviação. Nesse sentido, as pastagens, especialmente gramíneas, oferecem maior acúmulo do que as culturas anuais. Ao converter áreas agrícolas em pastagens, geralmente, há um aumento nos estoques de CO (Conant et al., 2001). Com o advento do SPD, solos já degradados têm retornado a valores próximos ou até maiores aos originais (Conceição et al., 2005), sendo uma das principais estratégias de manejo conservacionista.

O SPD tem se mostrado mais eficiente em promover incremento nos estoques de CO, dentre os sistemas de preparo utilizados (Lovato et al., 2004). No entanto, para que ele realmente cumpra com suas funções ecossistêmicas, é necessário não somente deixar de revolver o solo, mas, também, haver alto aporte de resíduos. A prova disso é que um SPD com pousio não se reflete em aumento de qualidade do solo, por não ter as adições de carbono necessárias para manter (ou aumentar) os estoques de CO (Conceição et al., 2005).

O acúmulo de matéria orgânica no solo faz com que melhore a sua qualidade (Vezzani & Mielniczuk, 2009), pois manejos conservacionistas aumentam a fração de carbono lábil do solo (Diekow et al., 2005). Devido a isso, a dinâmica da MOS nos sistemas de cultivos tem sido considerada como um indicador de alteração da qualidade do solo (Conceição et al., 2005).

2.3. Dinâmica da matéria orgânica do solo

O CO é o principal componente da MOS. O acompanhamento da sua evolução tem sido tema de vários estudos sobre essa dinâmica (Lovato et al., 2004, Bayer et al., 2006a; Souza et al., 2014; Yang et al., 2015). Os estoques de CO em um solo agrícola dependem da condição inicial desses elementos, da quantidade de resíduos que é aportada anualmente, da sua taxa de humificação e da taxa de perda da MOS. Em solos sem ação antrópica, os estoques de C são determinados pelos fatores de formação do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997).

Diversos modelos foram propostos para descrever as variações no estoque de CO no solo ao longo do tempo (Hénin & Dupuis, 1945; Jenkinson & Rayner, 1977; Van Veen & Paul, 1981; Janssen, 1984; Coleman & Jenkinson, 1996). Os modelos variam desde os mais complexos, com vários compartimentos da MOS (Parton et al., 1987; Metherell et al., 1994), até modelos unicompartmentais, como o proposto por Hénin & Dupuis (1945): $dC / dt = -K_2.C + K_1.A$, onde dC/dt expressa a taxa de variação no tempo do conteúdo de CO do solo ($Mg\ ha^{-1}$), A é a quantidade de C adicionado ao solo ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), C é o estoque de CO ($Mg\ ha^{-1}$), K_1 é a fração do C adicionado anualmente que passará a constituir a MOS (coeficiente isohúmico) e K_2 é o coeficiente de perda anual do CO do solo. Na prática, o sistema de preparo do solo e a sucessão ou rotação de culturas afetam basicamente os coeficientes K_2 e A do modelo matemático apresentado.

O parâmetro A representa a produção de biomassa de cada sistema de sucessão de culturas empregado ao longo do ano. Sistemas onde há inclusão de plantas com grande produção de biomassa, como plantas de metabolismo C4, terão maiores adições anuais de C ao solo do que sistemas onde predominem plantas de baixa produção de biomassa, como as C3. Assim, no contexto de SIPAs, pastejos mais intensivos terão, em contrapartida, menores adições anuais de C ao solo, enquanto que sistemas de pastejo mais equilibrados, ou sem pastejo, terão maiores adições de C ao solo (Assmann et al., 2014). Conforme anteriormente assinalado, para manter os estoques de CO do solo em plantio direto, é necessária uma adição anual de aproximadamente $4,4\ Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ (Mielniczuk et al., 2003), sendo que adições maiores

resultariam em um aumento dos teores de CO do solo. No entanto, deficiências nutricionais (Kirkby et al., 2014) ou um balanço negativo de N no sistema impedem que haja acúmulo de MOS (Roscoe et al., 2001).

Normalmente, os coeficientes K_1 e K_2 são calculados a partir da relação entre $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, usando técnicas isotópicas de C marcado (Cerri, 1986; Gregorich et al., 1995). No entanto, esses parâmetros também podem ser determinados em experimentos de longa duração, com valores de A e C_0 (estoque de carbono no início do experimento) conhecidos (Bayer et al., 2006a).

O parâmetro K_1 , que representa a taxa de conversão em MOS do C presente nos resíduos, varia de acordo com o clima local e é calculado a partir de equações lineares que relacionam as quantidades de C adicionados anualmente (A) e a variação dos estoques de CO no solo em relação ao seu estoque original (Mielniczuk et al., 2003). Apesar de Sanchez (1976) alegar que os valores de K_1 são semelhantes independentemente das condições climáticas, normalmente são verificados coeficientes de humificação mais elevados em regiões temperadas e frias (Feller & Beare, 1997), devido à ciclagem mais lenta da matéria orgânica particulada (Gregorich et al., 1995). Também é relatado que as raízes apresentam valores de K_1 mais elevado, o que, possivelmente, seja relacionado à proteção física no interior de agregados (Balesdent & Balabane, 1992; 1996).

O parâmetro K_2 é afetado principalmente pela textura do solo e seu método de preparo (convencional, reduzido ou plantio direto). São encontradas menores taxas de mineralização da MOS em solos argilosos (Dalal & Mayer, 1986), devido à proteção física do CO por microagregados, uma vez que a MOS não é afetada expressivamente pelo preparo de solo dessa classe textural (Bayer, 1996). Práticas que reduzem os mecanismos de proteção física da MOS, como a destruição de agregados pelo preparo convencional, aumentam o coeficiente de mineralização e, assim, resultam em diminuição da MOS (Tomazi, 2008). A temperatura também tem função importante na dinâmica desse atributo. Em regiões tropicais, são encontradas taxas de decomposição da matéria orgânica até cinco vezes superior às regiões temperadas (Sanchez & Logan, 1992).

A utilização da modelagem como ferramenta que permita simular a dinâmica da MOS permite uma melhor compreensão do funcionamento dos sistemas agropecuários e o desenvolvimento de atividades agrícolas mais eficientes e sustentáveis. Essa ferramenta, além de melhor avaliar a qualidade do solo, também informa sobre o sequestro carbono atmosférico e a mitigação do efeito estufa.

3. HIPÓTESES E OBJETIVOS

As hipóteses desta pesquisa são que: a) intensidades moderadas de pastejo aumentam os estoques de carbono do solo em relação ao início do experimento; b) sistemas integrados de produção agropecuária em Latossolo argiloso em plantio direto, apresentam altas taxas de humificação e baixas taxas de perda da matéria orgânica; e c) modelos de predição permitem demonstrar aumento nos estoques de carbono do solo submetido a intensidades moderadas de pastejo, chegando, em algum momento, a valores similares à mata nativa.

Nesse sentido, os objetivos deste estudo foram estimar os parâmetros da dinâmica da matéria orgânica do solo e utilizá-los nas predições e simulações a respeito do sequestro de carbono no solo, em um sistema integrado de produção de soja e bovinos de corte, no subtropical brasileiro, submetido a diferentes intensidades de pastejo de longa duração em plantio direto.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico do experimento

A pesquisa foi realizada em protocolo experimental que está sendo conduzido na Fazenda do Espinilho (Agropecuária Cerro Corado), localizada no município de São Miguel das Missões/RS, na região do Planalto Rio-Grandense (29°03'10" S latitude, 53°50'44" O longitude). A altitude do local é de 465 m e o clima caracteriza-se como subtropical úmido e quente (Cfa), segundo a classificação de Köppen (Köttek et al., 2006), com temperatura média anual de 19°C e precipitação média anual de 1.673 mm (CEMETRS, 2015) (Figura 1). O relevo é ondulado a suave ondulado e a localização na paisagem é topo de colina, com declividade entre 0,02 a 0,10 m m⁻¹.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (EMBRAPA, 2013), com textura argilosa (540, 270 e 190 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente). O teor de ferro solúvel em ditionito-citrato-bicarbonato e em oxalato de amônio é de 110,2 e 5,2 g kg⁻¹, respectivamente (Silva Neto et al., 2008).

Antes da instalação do experimento, a área era preparada convencionalmente desde a década de 1970 até 1993, quando passou a ser cultivada em semeadura direta. Em novembro de 2000, a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) foi implantada. A primeira entrada dos animais na área, de aproximadamente 22 hectares, ocorreu em junho de 2001, iniciando o

experimento em pastagem de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), de maio a novembro (período hibernal) e soja de novembro a maio (período estival).

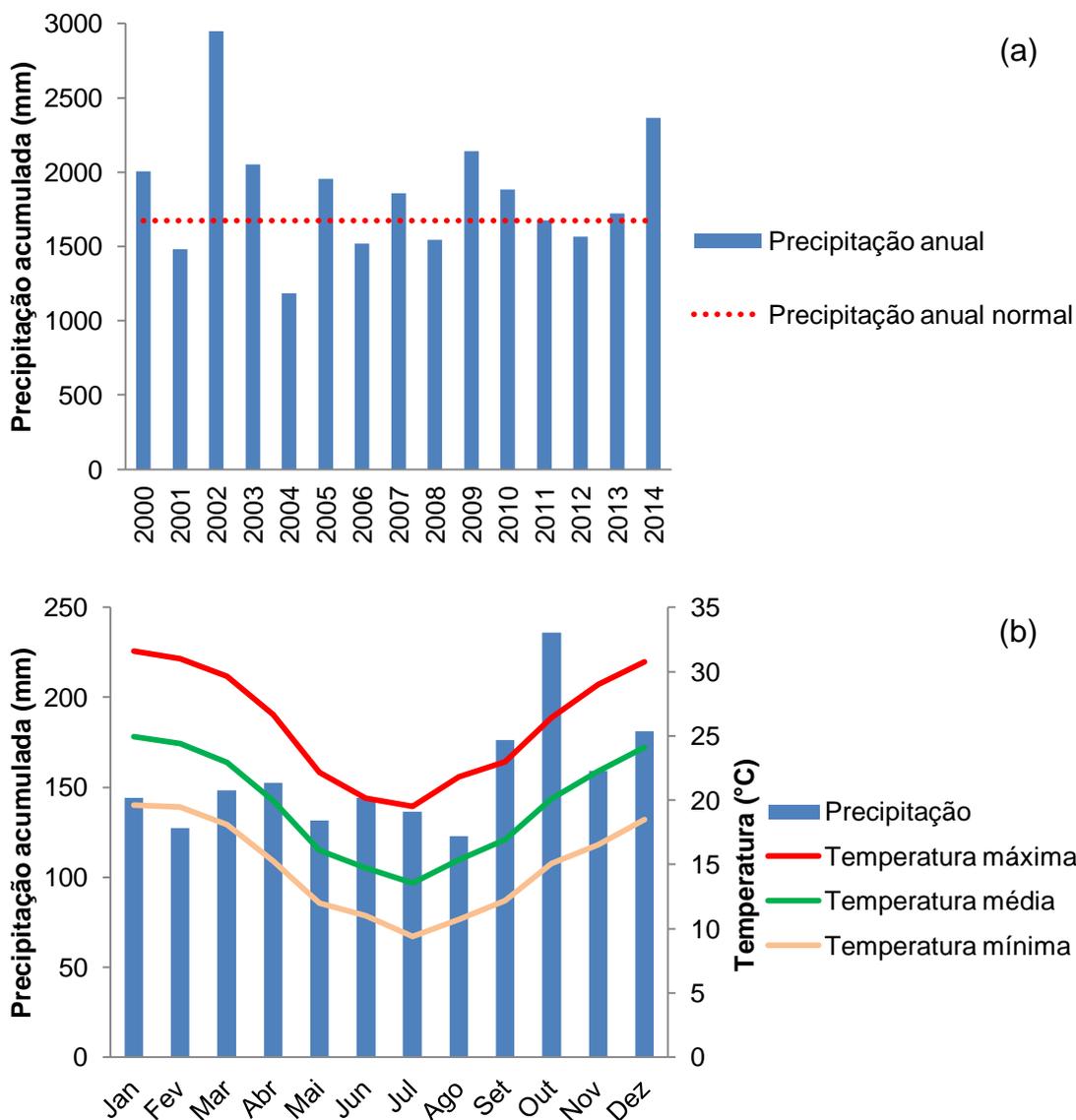


Figura 1. Precipitação ao longo da condução do experimento, juntamente com a precipitação anual normal (a), e precipitação mensal normal, temperaturas máximas, médias e mínimas mensais normais (b), em São Miguel das Missões/RS.

4.2. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistem de diferentes intensidades de pastejo no período hibernal, reguladas pela altura de manejo de pasto a 10, 20, 30 e 40 cm de altura, além das áreas sem pastejo, onde não há a presença de animais. As parcelas variam de 0,8 a 3,6 hectares. Os tratamentos de pastejo são dispostos em um delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições (Figura 2).

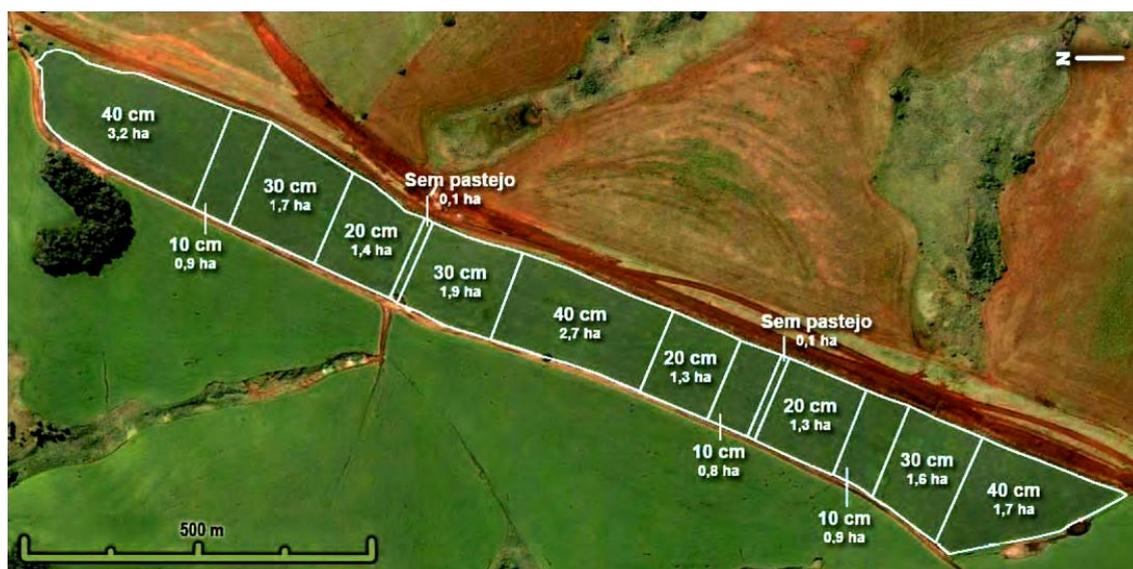


Figura 2. Vista geral da área experimental, com distribuição dos tratamentos de intensidade de pastejo (2001). Fazenda do Espinilho, São Miguel das Missões/RS.

4.3. Condução do experimento

O sistema consiste da produção integrada de bovinos de corte em pastagem de inverno e soja no verão, em plantio direto. Utilizam-se bovinos jovens, machos e castrados, com idade ao redor de 12 meses, sem padrão racial definido, que geralmente entram na área experimental com peso ao redor de 200 kg, simulando um sistema de recria de novilhos ou terminação de animais jovens. Durante o ciclo de pastejo, a alimentação dos animais é baseada unicamente na pastagem mista de aveia + azevém, com fornecimento apenas de sal comum (NaCl) em cochos. O método de pastejo adotado é o contínuo (com mínimo de três bovinos permanentes por parcela), com os

animais entrando na área quando o pasto atinge um acúmulo médio de 1500 kg ha⁻¹ de matéria seca (MS) e cerca de 20 cm de altura. Com isso, geralmente, o ciclo de pastejo se inicia na primeira quinzena de julho e se estende até a primeira quinzena de novembro.

A altura do pasto é acompanhada a cada 14 dias, pelo uso do método *Sward stick* (Bircham, 1981), que consiste da medição com um bastão graduado, cujo marcador corre por uma “régua” até tocar a primeira lâmina foliar da pastagem, procedendo-se então a leitura. Em cada parcela realizam-se cerca de 100 leituras (pontos), em caminhamento aleatório. A altura média desejada é obtida variando-se a carga animal, retirando-se ou colocando-se animais em função das medições, estando esta abaixo ou acima da altura pretendida, respectivamente.

Em dezembro, ocorre a semeadura da soja, com sementes inoculadas na dose recomendada para o produto em questão. A soja é colhida em abril do ano seguinte. O manejo da soja é sempre feito de acordo com as recomendações técnicas da pesquisa (RPSRS, 2000; 2001; 2002; 2003; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2012; 2014). A partir do outono de 2002 e até o presente momento repetiu-se o mesmo procedimento na implantação da pastagem e no manejo dos animais, seguidos da implantação e condução da cultura da soja.

4.4. Adubação e calagem

Após o primeiro ciclo de pastejo e antecedendo a implantação do primeiro ciclo da soja (novembro de 2001), foram aplicadas, na superfície do solo de toda a área experimental, 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT 62%), que correspondia à dose recomendada para aplicação superficial em sistema plantio direto consolidado (CQFS RS/SC, 2004).

A adubação consta, basicamente, da aplicação de N na pastagem, e de P e K na soja, considerando as análises de solo, em doses para produtividade entre 4,0 e 7,0 Mg ha⁻¹ de matéria seca de pasto e de 4,0 Mg ha⁻¹ de grãos de soja (CQFS RS/SC, 2004). Em relação às fontes, para o N, foi sempre utilizada ureia; para o P₂O₅, utilizou-se superfosfato simples no primeiro ciclo da soja e, nos demais, superfosfato triplo; e, para o K₂O, foi sempre

utilizado cloreto de potássio. Em torno de 45 dias após a semeadura da pastagem é realizada uma adubação nitrogenada de cobertura, com dose variando de 45 a 90 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia. Nos últimos dois anos foi realizada adubação sistêmica, onde toda a adubação passou a ser aplicada na pastagem, elevando-se a dose de nitrogênio para 150 kg ha⁻¹.

4.5. Etapa referente a presente pesquisa

Para o presente estudo, foi realizada coleta de solo após 13 anos da implantação do experimento. A amostragem foi feita em abril, após a colheita da soja da safra agrícola de 2013/2014, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm, utilizando pá de corte. As amostras foram compostas por seis subamostras dentro de cada parcela. Também foi coletado solo em uma mata nativa próximo ao experimento, para fins de comparação e referência. Após, as amostras foram levadas para o Laboratório de Pesquisa em Fertilidade do Solo – UFRGS, para secagem a 40 °C, retirada de raízes e resíduos e, por fim, moagem em almofariz. As amostras moídas foram enviadas para o Laboratório de Solos da Universidade Federal de Santa Maria e analisados os teores de CO por combustão seca em aparelho analisador elementar Analyser Organic Elementar Flash 2000.

Os estoques de CO foram calculados pelo método de massa equivalente de solo. Este método leva em conta a massa do solo dos tratamentos em relação ao solo com a maior massa, que é tido como referência (Ellert & Bettany, 1995). Dessa forma, o cálculo dos estoques foram baseados nas densidades de solo de 1,28 kg dm⁻³ para a camada de 0-5 cm e para as camadas de 5-20 cm, foi utilizada a densidade de 1,35 kg dm⁻³. Esses valores são do tratamento sem pastejo e, por ser um protocolo de longa duração, são utilizadas as densidades determinadas por Souza et al. (2009). Para calcular os estoques de CO, foi realizada a soma dos estoques de cada camada amostrada. Para a condição inicial do experimento (2001), foram utilizados dados de CO de Souza et al. (2009).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativa ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo

teste Tukey ($p < 0,05$). Os seguintes modelos estatísticos foram utilizados na ANOVA:

a) Teores de CO e N, e relação C/N nas diferentes camadas do perfil do solo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + \text{Erro a (ij)} + C_k + \text{Erro b (ik)} + T_j C_k + \text{Erro c (ijk)}$$

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco ($i = 1, 2, 3$); T = tratamentos (intensidades de pastejo e condição inicial) ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$); C = camada de solo ($k = 1, 2, 3, 4$) e Erro = erro experimental, por haver a restrição das camadas.

b) Estoques de CO na camada de 0-20 cm:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + T_j + \text{Erro (ij)}$$

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco ($i = 1, 2, 3$); T = tratamentos (intensidades de pastejo e condição inicial) ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$); e Erro = erro experimental.

Para descrever a dinâmica da matéria orgânica foi usado o modelo unicompartmental proposto por Hénin & Dupuis (1945). Trata-se de um modelo simples, o que facilita a sua aplicação, levando à obtenção de taxas médias de mineralização específicas para o local, condições climáticas, tipo de solo e histórico cultural (Andriulo & Galantini, 1993). O modelo utiliza um balanço médio de entradas e saídas de materiais orgânicos no período de um ano, não levando em conta a cinética intra-anual. O balanço é dado pela equação:

$$dC / dt = -K_2 \cdot C + K_1 \cdot A \quad (\text{Equação 1})$$

onde dC / dt expressa a taxa de variação no tempo do conteúdo de CO (Mg ha^{-1}), A é a quantidade de C adicionado ao solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), C é o estoque de CO do solo (Mg ha^{-1}), K_1 é a fração de C que é adicionado anualmente e que passará a constituir a MOS (coeficiente isohúmico) e K_2 é o coeficiente de perda anual do CO por oxidação microbiana, erosão e lixiviação.

Para as adições anuais de C (parâmetro A), foram utilizados os valores encontrados por Assmann et al. (2014), no mesmo protocolo experimental. Os valores de K_1 e K_2 foram calculados pelo ajuste da regressão

linear que correlaciona a adição anual de resíduos e os estoques de CO nos tratamentos (Figura 3). A equação usada foi:

$$y = a + bx \quad (\text{Equação 2})$$

onde, y = estoque de CO, a = CO do solo, caso não houvesse sido aportado resíduo pelo período de tempo experimental, b = acréscimo de CO proporcional à adição de carbono ao solo, x = carbono adicionado ao solo anualmente.

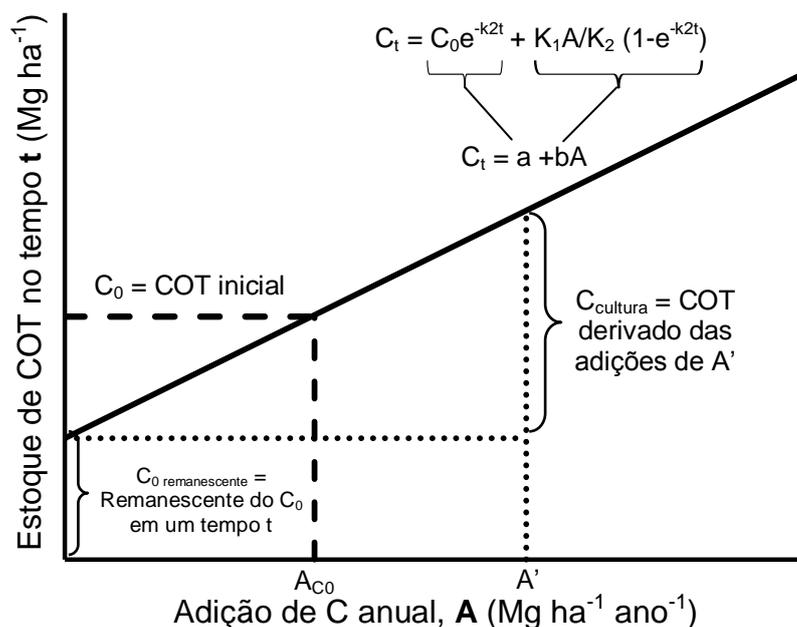


Figura 3. Representação esquemática da relação entre o estoque de carbono orgânico (CO) no tempo t e a adição anual (A) em um determinado sistema de cultivo. A equação linear $C_t = a + bA$ é equivalente ao modelo $C_t = C_0e^{-k_2t} + K_1A/K_2(1 - e^{-k_2t})$. A_{C_0} : adição anual de carbono requerido para manter C_0 . A^1 : adição de carbono pela cultura e a respectiva contribuição ($C_{cultura}$) no estoque de CO.

O valor de K_2 é expresso pela equação:

$$K_2 = (\ln C_0 - \ln a) / t \quad (\text{Equação 3})$$

onde, C_0 = estoque de CO inicial ($Mg\ ha^{-1}$) e t = tempo a que as parcelas estão sendo submetidas aos tratamentos (anos).

A determinação do coeficiente K_1 normalmente é feita com base em resultados de técnicas isotópicas (Balesdent & Balabane, 1996). No entanto,

valores aproximados podem ser obtidos em experimentos de longa duração, a partir do coeficiente angular da regressão linear que relaciona as quantidades de C adicionadas anualmente com a taxa de variação anual (dC / dt) no estoque de CO, na camada considerada do solo (Nicoloso, 2005). O K_1 é expresso pela equação:

$$K_1 = K_2 \cdot b / (1 - e^{-K_2 t}) \quad (\text{Equação 4})$$

A taxa de sequestro de carbono (TSC) é a variação anual de CO no solo ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$). É dada pela equação:

$$TSC = (C_t - C_0) / t \quad (\text{Equação 5})$$

Reordenando os termos da Equação 1, conforme Bayer et al. (2006a), é possível determinar o estoque de carbono em um tempo t (C_t), por intermédio da equação:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-K_2 t} + K_1 \cdot A / K_2 (1 - e^{-K_2 t}) \quad (\text{Equação 6})$$

onde o termo C_0 representa o estoque de CO do solo no início do experimento ($t = zero$). A primeira parte da equação ($C_0 \cdot e^{-K_2 t}$) se refere à perda do carbono já existente no solo ao longo do tempo, enquanto a segunda parte da equação [$K_1 \cdot A / K_2 (1 - e^{-K_2 t})$] diz respeito à humificação do carbono adicionado ao solo ao longo do tempo (Figura 3).

Pela Equação 6, constata-se que, quando o tempo tende a 0, $C_t = C_0$, e quando o tempo tende ao infinito, $C_t = C_e = K_1 \cdot A / K_2$. O rearranjo dessa equação também permite calcular o tempo de meia vida ($t_{1/2}$), o qual expressa o período de tempo, em anos, necessário para que o conteúdo de CO altere numa quantidade igual a metade da diferença entre C_0 e C_e (Dalal & Mayer, 1986).

$$t_{1/2} = (\ln 2) / K_2 \quad (\text{Equação 7})$$

Para estimar a quantidade de C que deve ser aportada anualmente ao solo, para manter os estoques de CO da condição inicial, utilizou-se a equação:

$$C_a = (C_0 - a) / b \quad (\text{Equação 8})$$

onde C_a expressa a quantidade de C a ser aportada anualmente ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); C_0 é o estoque de CO no início do experimento; a e b são obtidos

a partir da regressão linear pela correlação do carbono adicionado ao solo com os estoques de CO do solo.

Análises estatísticas de falta de ajuste (*Lack of Fit*, LOFIT) e raiz quadrada do erro (*Root Mean Square Error*, RMSE) foram utilizadas para verificar a acurácia das simulações em relação aos dados mensurados, segundo proposição de Smith et al. (1997), pelo uso do software Modeval 2.0. Como não há uma ferramenta para analisar estatisticamente as predições, os tratamentos serão comparados numericamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Acúmulo de carbono no solo

Os teores de CO na condição inicial e nas intensidades de pastejo decrescem em profundidade no solo ($p < 0,05$), assim como na mata nativa (Tabela 1). Esse processo ocorre mais acentuadamente em solos em plantio direto, devido ao fato de que os resíduos aportados em superfície não são incorporados ao solo (Briedis et al., 2012). Assim, só houve diferenças entre as intensidades de pastejo até a profundidade de 10 cm. Abaixo, todas elas se igualaram à condição inicial ($p > 0,05$). O tratamento Sem pastejo apresentou os maiores teores na camada de 0-5 cm ($p < 0,05$), juntamente com os pastejos moderados (20 e 30 cm). Na camada de 5-10 cm, o pastejo leve (40 cm) apresentou os maiores teores de CO, enquanto na condição inicial do experimento os teores eram os menores, sendo que as demais intensidades de pastejo não diferiram desses dois extremos ($p < 0,05$) (Tabela 1).

Era de se esperar que, quanto menos resíduo fosse aportado em superfície, menores seriam os teores de CO, principalmente na camada mais superficial (Conceição et al., 2013). Isso seria devido tanto à menor adição, quanto às maiores temperaturas encontradas em solo parcialmente descoberto (Belan et al., 2013). A maior temperatura aumenta a taxa de mineralização da MOS, decrescendo os estoques de CO do solo. No entanto, isso não ocorreu. O pastejo a 10 cm, apesar de apresentar o menor aporte de resíduos ao solo (Assmann et al., 2014), manteve os teores de CO na camada superficial (0-5 cm) semelhantes às demais intensidades de pastejo e à condição inicial

(Tabela 1). Isso pode ser devido à maior compactação superficial do solo (Costa, 2014), que é considerada, segundo Deurer et al. (2012), como um mecanismo de proteção extra da matéria orgânica.

Mesmo que não tenha havido diferenças entre os teores de CO nos tratamentos pastejados, pode estar havendo uma distribuição relativa das suas frações de forma diferenciada, interferindo na qualidade do solo (Roscoe et al., 2006). Esse efeito tinha sido observado em anos anteriores, onde os pastejos de 20 a 40 cm apresentaram maior teor de CO particulado (Assmann et al., 2014), sendo essa fração mais lábil e boa indicadora de qualidade do solo (Diekow et al., 2005).

Assim como os teores de CO, os teores de N também decresceram em profundidade ($p < 0,05$) (Tabela 1). O único comportamento distinto que houve para o N foi no tratamento Sem pastejo e na intensidade de pastejo a 30 cm, que apresentaram maior teor, enquanto as outras intensidades (10, 20 e 40 cm) não diferiram entre si. Em todos os tratamentos de pastejo (com e sem) esse atributo foi superior em relação à condição original do ensaio, pela entrada de N via fertilizantes minerais durante todo o período de condução do experimento.

Apesar dos teores de CO e N decrescerem em profundidade, o N diminui com mais intensidade, como demonstrado pela maior relação C/N ($p < 0,05$) (Tabela 1). Albuquerque et al. (2015), independentemente do tratamento avaliado, encontraram um aumento na relação C/N com a profundidade. A menor relação C/N em superfície (0-10 cm) pode ser devido à maior presença de raízes de soja nessa camada (Maria et al., 1999). Isto, porque no final do ciclo dessa cultura, os nódulos (ricos em N) são rapidamente decompostos, aumentando o teor de N mineral do solo. A intensidade de pastejo não afeta a relação C/N ($p > 0,05$), uma vez que ocorre acoplamento de C e N e acúmulo conjunto de ambos, cabendo aos animais fazerem o desacoplamento desses nutrientes, pela excreção predominante de C via fezes e de N via urina (Soussana & Lemaire, 2014). Foi verificado por Assmann et al. (2014), no presente experimento, que mais de 60% do N que é ciclado durante o pastejo mais intenso (10 cm) é excretado na forma de urina, que pode ser facilmente perdido por volatilização, desnitrificação, lixiviação e escoamento superficial (Oenema et al., 2005).

Tabela 1. Teores de carbono orgânico e nitrogênio, e relação C/N, no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto

Atributo	Camada	Em 2001	Altura de manejo do pasto				Sem pastejo	Média	Mata nativa ⁽¹⁾
			10 cm	20 cm	30 cm	40 cm			
	--- cm ---		----- g kg ⁻¹ -----						
Carbono orgânico	0 – 5	26,3 aC	27,4 aBC	28,6 aABC	30,0 aAB	27,0 aBC	31,8 aA	28,5	41,9
	5 – 10	19,4 bB	21,0 bAB	20,0 bAB	21,2 bAB	22,9 bA	19,6 bAB	20,7	25,6
	10 – 15	16,2 cA	15,2 cA	16,0 cA	16,4 cA	17,4 cA	16,5 cA	16,3	22,0
	15 – 20	15,1 cA	15,1 cA	15,1 cA	15,3 cA	15,5 cA	14,6 cA	15,1	19,1
Nitrogênio	0 – 5	2,32 aC	2,46 aBC	2,61 aBC	2,72 aAB	2,46 aBC	2,97 aA	2,59	3,96
	5 – 10	1,74 bB	1,88 bAB	1,82 bAB	1,90 bAB	2,08 bA	1,81 bAB	1,87	2,36
	10 – 15	1,38 cA	1,29 cA	1,38 cA	1,41 cA	1,52 cA	1,41 cA	1,39	1,91
	15 – 20	1,25 cA	1,23 cA	1,24 cA	1,25 cA	1,28 cA	1,22 cA	1,25	1,60
Relação C/N	0 – 5	11,2	11,1	10,9	11,0	10,9	10,7	11,0 c	10,6
	5 – 10	11,1	11,1	11,0	11,1	11,0	10,8	11,0 c	10,9
	10 – 15	11,7	11,9	11,6	11,7	11,5	11,7	11,7 b	11,5
	15 – 20	12,1	12,3	12,2	12,3	12,0	12,1	12,2 a	12,0
	0 – 20	11,6 A	11,6 A	11,4 A	11,5 A	11,4 A	11,3 A		11,2

⁽¹⁾ Área de referência da condição do solo sob vegetação natural.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Apesar das diferenças nos teores de CO, os estoques tiveram uma discreta variação entre os tratamentos, não diferindo entre si ($p>0,05$) (Figura 4). A mata nativa apresenta 72 Mg ha^{-1} , enquanto as intensidades de pastejo apresentam, em média, 54 Mg ha^{-1} , representando 75% dos estoques de CO da área referência. Esses menores estoques se devem aos 20 anos de preparo convencional da área, antes de iniciar o plantio direto, em 1993. Em anos anteriores, Souza et al. (2009) e Assmann et al. (2014) encontraram menores estoques de CO no pastejo a 10 cm em relação aos demais ($p<0,05$), que não diferiram entre si. Conant et al. (2001), fazendo uma meta-análise de 115 estudos, observaram que há um maior sequestro de carbono durante os primeiros 40 anos do início da adoção do sistema de plantio direto. Assim, há expectativa de que, na área do presente experimento, poderá ainda haver aumento nos estoques de CO com o passar do tempo.

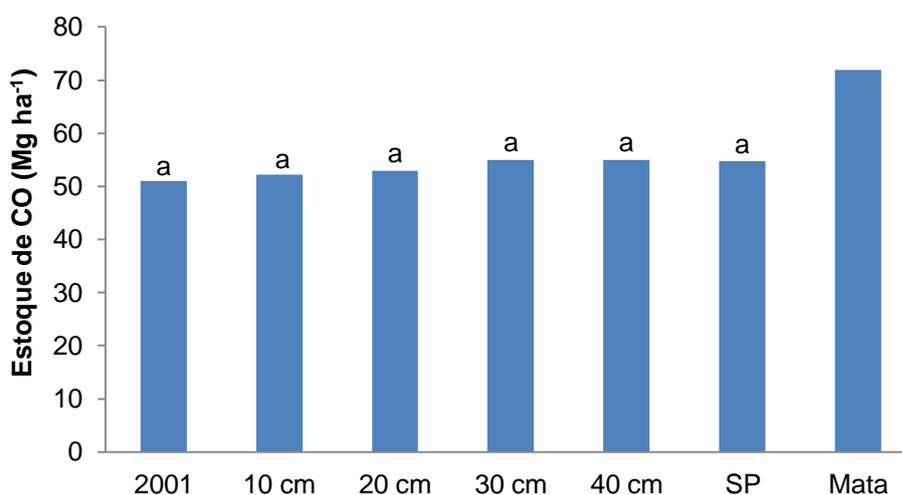


Figura 4. Estoques de carbono orgânico (CO) na camada 0-20 cm do solo no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto (SP = sem pastejo; Mata = referência).

O sistema plantio direto, mesmo quando bem conduzido, torna o ambiente mais heterogêneo (Souza et al., 1998). Com a presença do animal, a heterogeneidade do ambiente aumenta, visto que o mesmo pasteja de forma seletiva (Mezzalira, 2009) e excreta de forma concentrada e localizada (Silva et al., 2014). Mesmo no pastejo intenso, apenas 1,5% da área foi coberta por placas de esterco (Silva, 2012). Assim, caso o solo seja amostrado em locais com placas de esterco, mesmo de anos anteriores, sofrerá um efeito residual,

pois mais de 30% do esterco permanece no solo ao final de um ano, em forma recalcitrante, de difícil decomposição (Assmann, 2013). Esse efeito pode se estender ao perfil do solo, por incorporação do esterco pela atividade de insetos bioturbadores (Nichols et al., 2008), aumentando os teores de CO determinado em análise.

Segundo Silveira & Cunha (2002), haveria necessidade de apenas três subamostras para formar uma amostra composta, em plantio direto, admitindo-se uma variação da MOS em torno de 10% da média. Souza (1992), por sua vez, indica a necessidade de quatro subamostras e, segundo Schindwein & Anghinoni (2000), não há necessidade de ultrapassar sete subamostras. Assim, deve-se levar em conta a dificuldade em representar toda a variabilidade da área de estudo, em um sistema integrado de produção de grãos e carne, em parcelas experimentais consideradas grandes, variando de 0,8 a 3,2 ha no presente experimento.

O pastejo mais intenso (10 cm), apesar de ter a menor adição de resíduos (Assmann et al., 2014), apresentou estoques de CO semelhantes às outras intensidades (Figura 4). Isto se deve à sua maior produção de raízes, comparativamente às demais alturas de manejo de pasto (Souza et al., 2009), uma vez que as mesmas são o atributo que mais se correlaciona com os estoques de CO (Albuquerque et al., 2015), possivelmente, devido ao maior coeficiente de humificação do carbono, que é 2,3 vezes maior que o dos resíduos da parte aérea (Kätterer et al., 2011).

Os estoques de CO estão muito relacionados à textura e à mineralogia do solo, devido à respectiva proteção física que exercem (Tomazi, 2008). Solos argilosos possuem estoques de CO maiores do que solos arenosos em condições de aporte semelhante de resíduos (Bayer et al., 2006b). Os estoques de CO encontrados em nosso trabalho são semelhantes aos 58 Mg ha⁻¹ encontrados por Albuquerque et al. (2015), em sistema de cultivo que aporta quantidades de resíduos (trigo/soja) semelhantes aos do presente estudo, em Latossolo vermelho cultivado em SPD, no subtropical. Vale lembrar que se verifica em SIPAs um rápido incremento na qualidade do solo, pois oito anos desse sistema proporcionam uma qualidade do solo semelhante à encontrada após 23 anos de SPD em sua forma pura (Silva et al., 2011a). Mesmo assim, os estoques de CO em 13 anos do sistema soja-bovinos de

corte em plantio direto, representaram apenas 75% do estoque de CO da mata nativa (Figura 4), uma situação diferente daquela reportada por Braz et al. (2013) em que após 18 anos de utilização de pastagens produtivas, os estoques de CO do solo eram superiores aos da vegetação natural.

É importante observar que o resíduo da parte aérea da pastagem é apenas um dos componentes da entrada de carbono no sistema. Assim, se de um lado o manejo do pasto a 10 cm resulta em menor quantidade de resíduos de parte aérea, é o tratamento que possui a maior deposição de esterco (Silva, 2012) e o maior crescimento radicular da pastagem (Souza et al., 2009). Além desses resíduos, há também a contribuição dos resíduos da soja (parte aérea e raízes) que podem diminuir a significância das diferenças obtidas em função do resíduo da parte aérea da pastagem.

5.2. Dinâmica e predição do acúmulo de carbono no solo

Apesar de os estoques de CO não diferirem significativamente entre as intensidades de pastejo ($p > 0,05$) na presente avaliação (Figura 4), os estoques de CO do solo apresentaram uma relação linear ($R^2 = 0,98$) com o aumento do aporte de carbono (Figura 5). Para isso, considerou-se o estoque inicial (2001) (Souza et al., 2009), o somatório das adições de carbono ao longo do tempo (Assmann et al., 2014) e os estoques de CO aos 13 anos de condução do experimento. Esse aporte aumentou com a diminuição da intensidade de pastejo até 30 e 40 cm de altura do pasto, havendo uma tendência de pequeno decréscimo no tratamento Sem pastejo (Tabela 2). Shi et al. (2013) observaram que os estoques de CO diminuem quando há a exclusão do pastejo, possivelmente devido à menor produção de raízes.

Como os valores preditos de CO pelo modelo unicompartmental são muito próximos aos observados (Tabela 2 e Figura 6), cujo coeficiente de determinação é próximo da unidade ($p < 0,05$) (Figura 5), o modelo mostrou uma boa correlação entre os estoques de CO e adição de resíduo. Assim, espera-se que o modelo seja eficiente na predição de estoques de CO nesse experimento de longa duração. Pelos resultados obtidos (Figura 5), estima-se que 44,1 Mg ha⁻¹ de CO na camada de 0-20 cm seriam provenientes do C original que remanesceu no solo após os 13 anos de experimento.

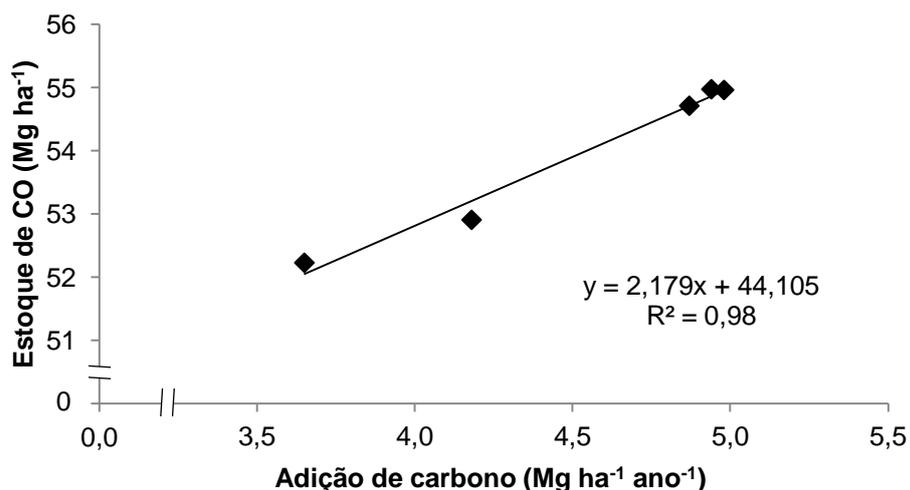


Figura 5. Relação entre os estoques de carbono orgânico (CO) e a adição anual de carbono ao solo em sistema integrado de produção soja-gado de corte em plantio direto.

Tabela 2. Adição anual de C, estoques de carbono orgânico (CO) inicial (C_0), observado e estimado por regressão linear, em um sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto

Altura de manejo do pasto	Adição anual de C ⁽¹⁾	C_0 ⁽²⁾	CO observado ⁽³⁾	CO estimado ⁽⁴⁾
		----- Mg ha ⁻¹ -----		
10 cm	3,65	50,98	52,23	52,06
20 cm	4,18	50,98	52,91	53,21
30 cm	4,98	50,98	54,97	54,96
40 cm	4,94	50,98	54,98	54,87
Sem pastejo	4,87	50,98	54,72	54,72

⁽¹⁾ Somatório das adições de carbono adicionado pela parte aérea e raízes de soja e pastagem, e esterco (Assmann et al., 2014); ⁽²⁾ Estoque de carbono orgânico no início do experimento (Souza et al., 2009); ⁽³⁾ Estoque de carbono orgânico do solo analisado 13 anos após a condução dos tratamentos; ⁽⁴⁾ Estoque de carbono orgânico do solo estimado por regressão linear.

Para verificar a acurácia das simulações em relação aos resultados observados, foram utilizadas as análises estatísticas de falta de ajuste (LOFIT) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), segundo a proposição de Smith et al. (1997) (Tabela 3). O teste F para significância do LOFIT indicou que o erro total dos valores simulados é menor do que o erro inerente dos valores observados no campo ($F < F_{5\%}$). Os sistemas avaliados apresentaram $RMSE < RMSE_{95\%}$,

indicando que os valores simulados se encontram dentro do intervalo de confiança (95%) dos resultados mensurados. Portanto, a estimativa dos coeficientes K_1 e K_2 e a posterior simulação utilizando os valores desses coeficientes no modelo unicompartmental demonstram que a metodologia condiz com a dinâmica do C no solo nas condições do experimento.

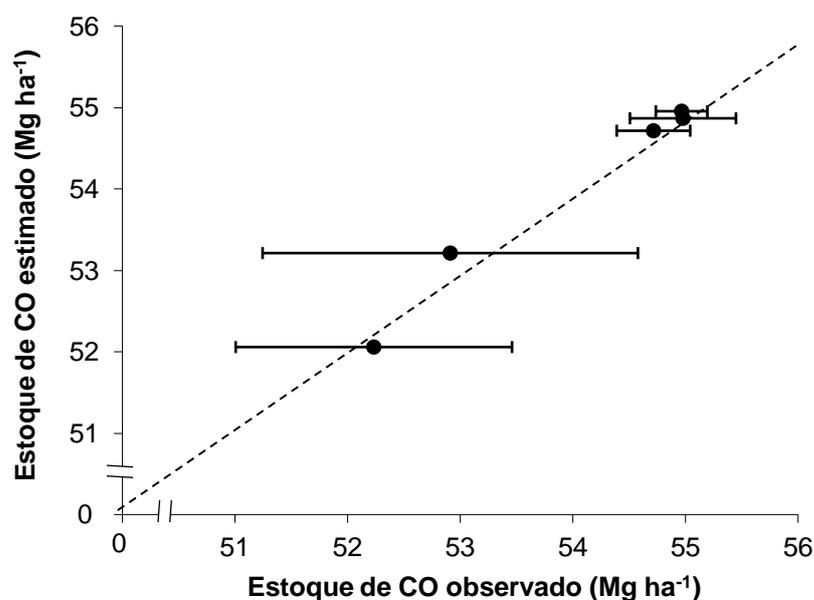


Figura 6. Relação entre os estoques de carbono orgânico (CO) estimados pelo modelo unicompartmental e os estoques de CO observados, na camada de 0-20 cm do solo após 13 anos do sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto.

Tabela 3. Análises de falta de ajuste (LOFIT) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para avaliar a acurácia da simulação realizada pelo modelo unicompartmental utilizando os coeficientes K_1 e K_2 em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte em plantio direto

LOFIT	$F^{(1)}$	$F_{5\%}$	RMSE ⁽²⁾	RMSE _{95%}
0,40	0,00	3,41	0,30	22,73

⁽¹⁾ O teste F determina a significância da falta de ajuste (LOFIT). Valores de $F < F_{5\%}$ indicam que os valores simulados não diferem significativamente dos valores observados; ⁽²⁾ Valores de $RMSE < RMSE_{95\%}$ indicam que os valores das simulações se encontram dentro do intervalo de confiança (95%) dos valores observados.

De posse da Equação 3, obtém-se valor de K_2 (coeficiente de perda anual do CO) de $0,011 \text{ ano}^{-1}$. Assim, estima-se que 1,1% da matéria orgânica

do solo na camada de 0-20 cm se decomponha no período de um ano. Esse valor é considerado baixo, devido ao não revolvimento do solo pela semeadura direta tanto da soja quanto da pastagem e explicado pela menor oxidação microbiana da MOS em solos sob plantio direto (Reicosky & Lindstrom, 1993). A textura argilosa do solo do experimento também propicia maior proteção física da matéria orgânica, o que também contribui para o menor valor de K_2 (Tomazi, 2008).

O valor de K_2 encontrado no presente trabalho ($0,011 \text{ ano}^{-1}$) é similar ao encontrado por Bayer (1996) e por Campos et al. (2011), de $0,012$ e $0,011 \text{ ano}^{-1}$, respectivamente, em Latossolos em plantio direto. No entanto, em solos mais arenosos, como os Argissolos, os valores de K_2 são maiores, situando-se em torno de $0,019$ e $0,029 \text{ ano}^{-1}$ (Bayer et al., 2000; Bayer et al., 2006a), também em sistemas de produção em plantio direto. Isso se deve à menor proteção física que os solos menos argilosos possuem (Silva et al., 2006). A variação de K_2 de solos com semelhante textura e mineralogia em regiões de clima similar pode ser devido ao tipo de equipamento para a deposição do adubo na linha de semeadura utilizado nas semeadoras e às condições de umidade do solo no momento da semeadura. Conte et al. (2011) demonstraram que, mesmo em semeadura direta, pode haver uma expressiva mobilização de solo, resultando numa emissão diária de C-CO₂ cerca de 50% maior do que antes dessa operação agrícola (Pes et al., 2011).

Em preparo convencional, o coeficiente K_2 pode chegar a valores muito maiores. Cerri (1986) estimou, pela relação isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, uma taxa de perda de matéria orgânica de $0,101 \text{ ano}^{-1}$, em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. Geralmente as maiores taxas de decomposição da matéria orgânica ocorrem nos trópicos úmidos (Sanchez & Logan, 1992), mas são contra balanceadas pelas maiores adições de resíduos, resultando em um balanço de CO similar às regiões temperadas (Sanchez et al. 1982). Em condições mais propícias à oxidação microbiana, como o Cerrado brasileiro, o valor de K_2 pode chegar até $0,32 \text{ ano}^{-1}$ (Silva et al., 1994). Essas altas taxas de perda de matéria orgânica devem-se, possivelmente, à erosão do solo em sistema de intensa mobilização.

Contudo, alguns autores verificaram, em preparo convencional, valores de K_2 menores em relação aos apresentados anteriormente. Bayer

(1996) verificou, num Latossolo do sul do Brasil, taxa de decomposição da matéria orgânica de $0,014 \text{ ano}^{-1}$. Apesar de ser um valor próximo ao que foi encontrado em plantio direto, representou um aumento de 17%. Em Argissolo, esse efeito é muito mais pronunciado, podendo ser de 89 a 131% superior ao plantio direto (Lovato et al., 2004; Bayer et al., 2006a).

A falta de padronização da espessura da camada avaliada dificulta a comparação de valores entre experimentos. Quanto menor for essa camada, maiores tendem a ser os valores de K_2 , devido à atividade microbiana ser mais intensa em superfície (Graham & Haynes, 2005). Assim, como há estudos na literatura que avaliam camada de 5, 10, 15, 17,5 e 20 cm (Cerri, 1986; Gregorich et al., 1995; Nicoloso, 2009; Vieira et al., 2009; Mazurana et al., 2013), muitas vezes, essa variação não permite uma comparação de valores.

Para obter o valor da taxa de humificação (K_1) foram utilizados valores médios dos tratamentos de intensidade de pastejo. Assim, mesmo que haja diferença entre a natureza (esterco, parte aérea e raiz) e composição (teor de lignina, relação C/N) dos resíduos aportados ao solo (Assmann, 2013), eles serão considerados uniformes, visto que o K_1 é uma taxa média dos resíduos que são humificados.

O valor de K_1 , obtido pela Equação 4, foi de $0,180 \text{ ano}^{-1}$. Assume-se, assim, que 18% do carbono adicionado anualmente será humificado, passando a compor a matéria orgânica do solo. No sul do Brasil, há relatos de K_1 de $0,146$ e $0,096 \text{ ano}^{-1}$, para o sistema de plantio direto (Bayer et al., 2006a; Vieira et al., 2009). O valor desse coeficiente depende do tempo de permanência do resíduo no solo. Regiões onde os fatores edafoclimáticos não favorecem a atividade microbiana têm maiores valores de K_1 , pois haverá uma ciclagem mais lenta da matéria orgânica particulada (Gregorich et al., 1995). Do mesmo modo, as características intrínsecas do resíduo, como a sua origem e composição, terão efeito direto no tempo de sua permanência no solo.

O valor encontrado ($0,180 \text{ ano}^{-1}$) também se situa dentro da faixa encontrada por Bolinder et al. (1999) e Gregorich et al. (1995), que varia de $0,077$ a $0,23 \text{ ano}^{-1}$. Esses autores consideram que o K_1 da parte aérea é diferente do K_1 do sistema radicular, apresentando, como valores médios, $0,122$ e $0,211 \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Segundo Kätterer et al. (2011), o coeficiente de humificação do carbono derivado de raízes é cerca de 2,3 vezes

maior do que dos resíduos aportados em superfície, sendo responsável por até 80% do acréscimo na fração lábil de carbono do solo (Mazzilli et al., 2015). Isso se justifica pela composição bromatológica das raízes, que possuem relação C/N entre 43-79 (Gordon & Jackson, 2000) e até 25% de lignina, sendo mais recalcitrantes do que a parte aérea (Goulart et al., 2012). Assim, mesmo que o solo possua um suprimento adequado de N, a energia necessária para decompor as raízes é relativamente grande, o que levará a um maior tempo de permanência no solo. Além desses fatores, uma parte considerável das raízes está protegida por agregados (Torres & Saraiva, 1999), dificultando o acesso dos microrganismos para efetuar a decomposição (Golchin et al., 1994).

Os restos culturais que apresentam teor de N menor que 18 g kg^{-1} e relação C/N maior que 20 imobilizam o N e, conseqüentemente, necessitam um tempo maior para decomposição (Trivelin et al., 1995). Na média das intensidades de pastejo, a relação C/N das adições aportadas em superfície é 19,1 (Assmann et al., 2014) e, com exceção do colmo da soja e do resíduo do pasto no pastejo mais intenso (10 cm), todos os demais resíduos possuem teor de N maior que 18 g kg^{-1} (Assmann, 2013). Estes fatos somados, juntamente com as condições edafoclimáticas, favorecem a decomposição microbiana dos resíduos, diminuindo seu tempo de permanência no solo. Assim, os trabalhos que utilizam K_1 de 20%, originado no trabalho com cana de açúcar de Cerri (1986), estão subestimando as quantidades de resíduos humificados no período de um ano, pois essa cultura possui composição bromatológica de difícil decomposição (Oliveira et al., 1999).

Por outro lado, há indícios que o tempo de permanência dos resíduos não tenha papel decisivo na sua humificação. As leguminosas, apesar de ter uma relação C/N menor do que as gramíneas, o que resultaria em um menor tempo de permanência, possuem um coeficiente de humificação mais alto (Larson et al., 1972). Isso pode ser devido ao fato desses elementos (C e N) já estarem acoplados em uma relação C/N semelhante à dos microrganismos, não havendo a necessidade de ser acoplado o C dos resíduos ao N mineral do solo, tornando o processo de anabolismo microbiano mais eficiente (Soussana & Lemaire, 2014).

Utilizando-se a Equação 5 obteve-se as taxas de sequestro de carbono (TSC), que variaram entre $0,097$ e $0,308 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 4),

sendo proporcionais ao aporte de resíduo (Souza et al., 2009; Assmann et al., 2014). Em regiões temperadas, a TSC pode chegar até $1,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Lal, 2008). Bayer et al. (2006b) calcularam que, para a região dos trópicos e subtropicais, haveria uma TSC média de 0,35 e 0,48 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Porém, esses autores ressaltam que os valores de referência são os estoques de CO a partir do preparo convencional, além de que esse modelo matemático só é válido para os primeiros 10-20 anos de plantio direto. A TSC, a exemplo do encontrado por Nicoloso (2009), ocorre de forma logarítmica, com maiores valores no início do experimento e reduzindo com o passar do tempo. Como a área experimental está em plantio direto desde 1993, a TSC pode já se encontrar em fase de declínio.

Tabela 4. Taxa de sequestro de carbono em relação à quantidade de carbono adicionada anualmente em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto

Tratamentos	K_1 ⁽¹⁾	K_2 ⁽²⁾	C_0 ⁽³⁾	A ⁽⁴⁾	TSC ⁽⁵⁾ estimada	TSC observada
	----- ano^{-1} -----	-----	-- Mg ha^{-1} --	-----	$\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	-----
10 cm				3,65	0,083	0,097
20 cm				4,18	0,172	0,149
30 cm	0,180	0,011	50,98	4,98	0,306	0,307
40 cm				4,94	0,299	0,308
Sem pastejo				4,87	0,288	0,288

⁽¹⁾ Coeficiente de humificação da matéria orgânica; ⁽²⁾ Coeficiente de perda da matéria orgânica; ⁽³⁾ Estoque de carbono no início do experimento; ⁽⁴⁾ Carbono adicionado anualmente; ⁽⁵⁾ Taxa de sequestro de carbono (TSC) estimada pelo modelo unicompartmental.

Para visualizar melhor as variações, a TSC deveria ser calculada para compartimentos específicos de carbono, os quais possuem taxas de renovação (“turnover”) muito distintas. Nos primeiros 10 anos de plantio direto, o carbono acumulado é facilmente oxidável, compondo principalmente a fração lábil da MOS (Corsi et al., 2012). Assim, haveria um aumento relativamente rápido nos estoques de carbono lábil, o que mudaria as taxas de decomposição da MOS, tendendo a um novo estado estável; um equilíbrio dinâmico.

Zanatta & Salton (2010) reportam que há um maior incremento na TSC em SIPAs, do que no sistema de plantio direto em sua forma pura, possivelmente devido ao efeito do animal atuando como um catalisador dos processos que ocorrem no solo (Anghinoni et al., 2013). Sistemas envolvendo gramíneas forrageiras possuem um maior aporte de raízes do que sistemas de culturas graníferas (Rees et al., 2005). Em SIPAs, há um maior crescimento radicular da pastagem (Carvalho et al., 2011). O mesmo se aplica quando é excluído o pastejo em um sistema pastoril (Shi et al., 2013). Como as raízes possuem K_1 maior do que a parte aérea haverá um maior acúmulo de carbono no sistema oriundo do sistema radicular.

O tempo necessário para o C estabilizar no solo (suas entradas serem iguais às saídas), mantendo-se os atuais manejos, é dependente da taxa de humificação dos resíduos e decomposição da MOS. Assim, por utilizarem a mesma taxa média de humificação e decomposição, todos os tratamentos levarão o mesmo tempo para estabilizar, mas em patamares distintos. O estoque de CO que cada tratamento será capaz de acumular (Ce) (Tabela 5) pode ser obtido usando-se a Equação 6. Esse valor é um indicativo do potencial de sequestro de carbono que cada tratamento possui.

Tabela 5. Predição do acúmulo da matéria orgânica do solo pelo modelo unicompartimental em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto

Tratamento	CO atual ⁽¹⁾	CO _{50% Ce} ⁽²⁾	Ce ⁽³⁾
	----- Mg ha ⁻¹ -----		
10 cm	52,06	54,98	58,99
20 cm	53,21	59,25	67,56
30 cm	54,96	65,70	80,49
40 cm	54,87	65,37	79,84
Sem pastejo	54,72	64,81	78,71
Mata	71,98	71,98	71,98

⁽¹⁾ Carbono orgânico ajustado pela regressão linear; ⁽²⁾ 50% da variação entre os estoques de CO no início do experimento e o Ce; ⁽³⁾ Carbono orgânico a que o sistema tenderá a estabilizar.

O modelo considera que não haverá variação nas condições de clima no período de predição. Apesar de indicativos que estamos em um processo de aquecimento global (Kerr, 2001), a temperatura influencia menos nos estoques de CO do que o volume e a distribuição de chuvas (Selmants et al., 2014). Ainda assim, a maioria de estudos sobre aquecimento global e decomposição da MOS são feitos focando-se em compartimentos da MOS com “*turnover*” muito curto, o que superestimaria o efeito da temperatura na dinâmica da MOS (Conant et al., 2011). Aumentos na temperatura também influenciariam a adição de resíduos, visto que aumenta a probabilidade de perda de produtividade das culturas (Lobell & Tebaldi, 2014).

Segundo o modelo utilizado, o solo nos pastejos a 30 e 40 cm de altura e sem pastejo tenderá a ter seu estoque de C estabilizado (Ce) entre 78,71 e 80,49 Mg ha⁻¹, cujos valores são os maiores entre os sistemas avaliados, sendo, inclusive, superior à mata, tomada como referência e em equilíbrio dinâmico, com 71,98 Mg ha⁻¹. Braz et al. (2013) ressaltam que pastagens produtivas podem apresentar estoques de CO superiores à vegetação nativa. Por outro lado, no extremo inferior, o estoque de CO do solo no pastejo a 10 cm tenderá ao valor de 58,99 Mg ha⁻¹, o que equivale a 73% do estoque do tratamento 30 cm, na camada avaliada. São mais de 20 Mg C ha⁻¹ que vão deixar de ser fixados no solo considerando apenas a camada de 0-20 cm, e essa diferença seria ainda maior se fossem levadas em consideração as camadas mais profundas (Varvel & Wilhelm, 2011; Harper & Tibbett, 2013). Também se observa que o pastejo intenso está muito próximo de atingir seu potencial de sequestro de carbono (Ce).

O sequestro de 25,5 Mg C ha⁻¹, no pastejo a 30 cm, começa a perder importância, quando comparado a outros protocolos experimentais, devido ao baixo aporte anual de carbono (menos de 5 Mg ha⁻¹). Vieira (2007), trabalhando com o consórcio guandu+milho, em um Argissolo, encontrou um potencial de sequestro de carbono de 27,3 Mg ha⁻¹. Ou seja, mesmo com um coeficiente de perda 27% maior que o do presente experimento, conseguiu ter 7% a mais de sequestro de carbono no solo. Isso se deve ao alto aporte de resíduo que essas culturas proporcionam (7,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Da mesma forma, Bayer et al. (2000), no sistema aveia+ervilhaca/milho+caupi, mesmo com um K₂ 163% maior, reportou potencial para adicionar até 87% do que no protocolo

experimental em pauta. Isso evidencia a importância da adição de resíduos ao sistema, para não apenas manter o balanço de carbono, mas para a mitigação dos gases de efeito estufa (Carvalho, 2010; Bayer et al., 2011).

Ao avaliar a evolução do CO ao longo do tempo, considera-se que a mata já tenha atingido o clímax, não tendo mais variação com o passar dos anos. Analisando o C_e , percebe-se que os pastejos a 10 e 20 cm não atingirão os estoques da mata (Figura 7) e que o pastejo a 10 cm terá um acréscimo de apenas 7 Mg ha^{-1} (Tabela 5). Nessa mesma fase de acúmulo, os pastejos de 30 e 40 cm de altura de manejo do pasto e do Sem pastejo, estarão com estoques muito similares, porém acima do da mata.

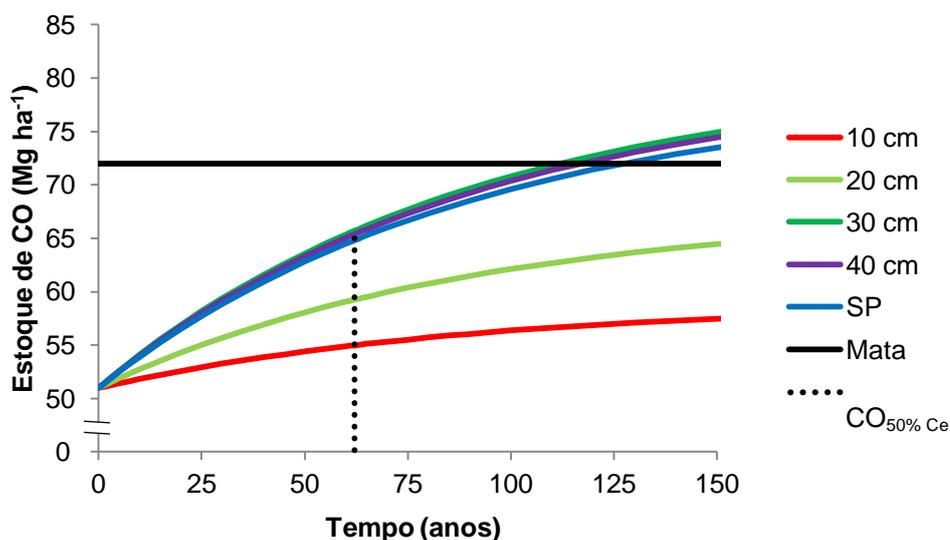


Figura 7. Evolução do estoque de carbono orgânico (CO) predito pelo modelo unicompartimental ao longo do tempo em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto.

No entanto, o incremento de CO no solo ocorre em forma logarítmica (Figura 7), ou seja, os estoques de CO somente tendem a atingir o clímax. Ademais, com o passar do tempo, há um incremento na fração lábil da MOS (Bayer et al., 2004), o que irá alterar as taxas de perda dessa matéria orgânica, visto que essa fração é decomposta mais rapidamente (Krull et al., 2003). Por outro lado, com o passar do tempo haverá um aumento na agregação do solo, que é um dos mecanismos de proteção da matéria orgânica (Boeni et al., 2014). Assim, quando se utiliza um modelo de predição unicompartimental, é preciso ter cautela na interpretação das predições, pois esse modelo utiliza apenas valores médios, sendo que os compartimentos da MOS tem “turnover”

que varia de poucos meses até milhares de anos (Mendonça & Leite, 2006). Espera-se que a predição até $CO_{50\% C_e}$ seja mais confiável, e isso ocorrerá 62 anos após o início do experimento (Figura 7).

O $t_{1/2}$, obtido a partir da Equação 7, expressa o período de tempo, em anos, necessário para que o conteúdo de carbono orgânico altere numa quantidade igual a metade da diferença entre C_o e C_e (Dalal & Mayer, 1986). Este valor é inversamente proporcional ao coeficiente de perda de matéria orgânica. O $t_{1/2}$ do presente experimento é de 62 anos (Figura 7), e expressa o tempo em que o solo irá atingir $CO_{50\% C_e}$ (Tabela 4).

Comparativamente ao preparo convencional, o $t_{1/2}$ é alto. Em condições de subtropical, Andriulo et al. (1999) e Garcia-Préchac et al. (2004) encontraram $t_{1/2}$ de 25 anos na Argentina e 40 anos no Uruguai, respectivamente. No Rio Grande do Sul, Pöttker (1977) encontrou $t_{1/2}$ de 15 anos. Percebe-se que, à medida que se aumenta a latitude, diminui-se o $t_{1/2}$. Silva et al. (1994), trabalhando no Cerrado brasileiro (oeste da Bahia), encontraram $t_{1/2}$ de apenas 3 anos. Como mencionado anteriormente, nessa situação pode ter havido um processo erosivo intenso atuando simultaneamente com a atividade microbiana.

Infelizmente, quanto menos conservacionista é o sistema, menor é o $t_{1/2}$. Em preparo convencional é perdida a MOS mais rapidamente do que é acumulada em sistema de plantio direto. Isso é mais visível em clima tropical e subtropical. Bayer et al. (2006a) encontraram $t_{1/2}$ de 17 e 36 anos para preparo convencional e SPD, respectivamente. Quando o balanço de carbono é positivo (SPD) demora o dobro do tempo para haver a metade da variação entre C_o e C_e , do que quando o balanço é negativo.

A simulação dos estoques de carbono ($CO_{50\% C_e}$) no solo no período de 62 anos a partir do início do experimento em 2001 (Figura 8) foi realizada, para cada intensidade de pastejo, pelo uso da Equação 6, utilizando-se os valores de K_1 e K_2 estimados neste estudo e valores de adição anual de C pelas culturas (Tabela 4).

Conforme visto anteriormente, o CO original decresce no solo em função do K_2 . Logo, os estoques de C original de todos os tratamentos decrescem igualmente, chegando ao ano 62 com $25,55 \text{ Mg ha}^{-1}$. O que diferencia os tratamentos é a quantidade que é aportada (C adquirido), que

variou entre 29,42 e 40,14 Mg ha⁻¹, nos tratamentos 10 e 30 cm, respectivamente. Isso resultou numa diferença de potencial de sequestro de carbono de 10,72 Mg ha⁻¹ entre esses tratamentos.

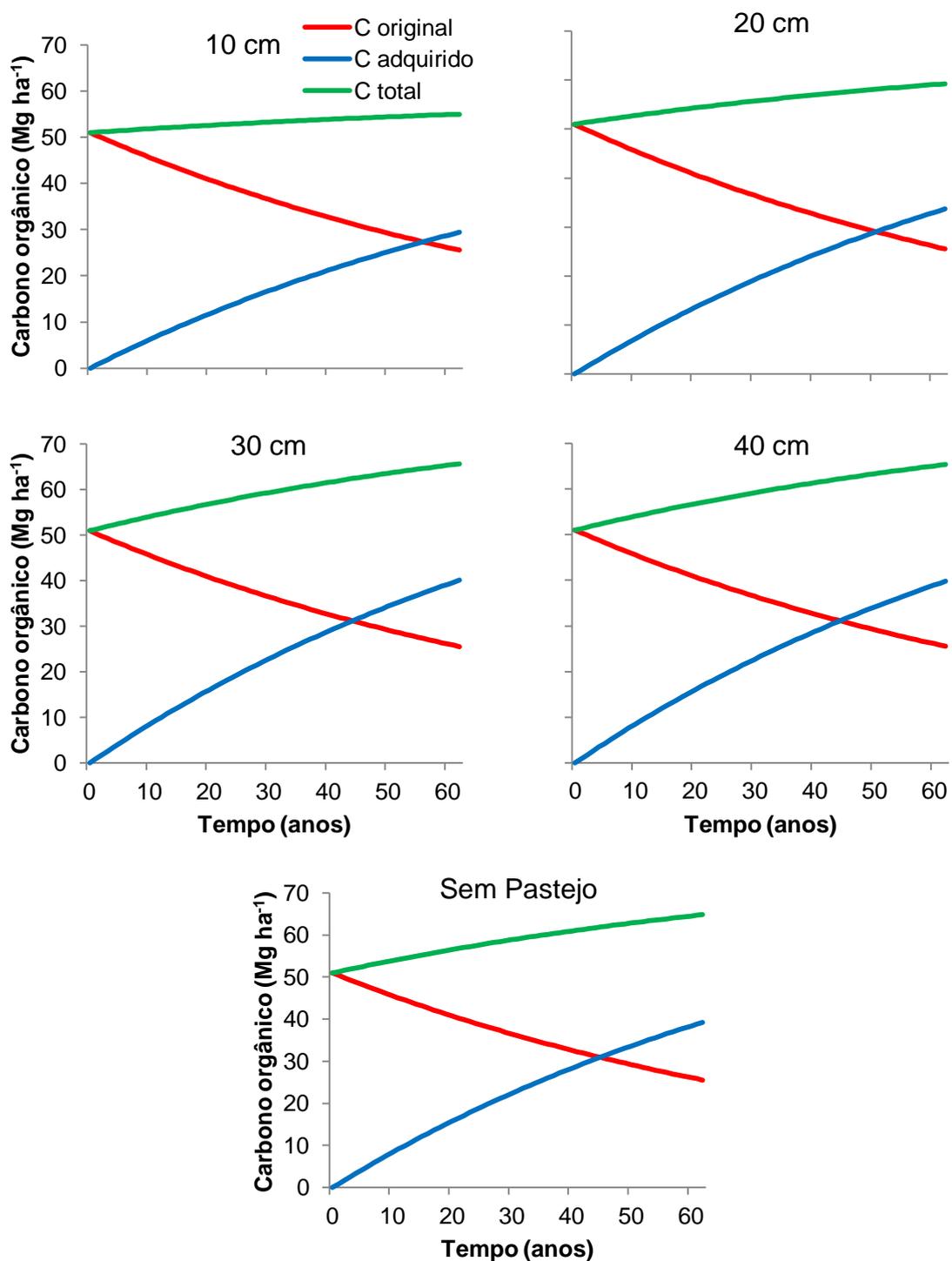


Figura 8. Simulação dos estoques de C original, C adquirido e C total, no período de 62 anos a partir do início do experimento em 2001, em um sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto.

Quanto mais C é adicionado anualmente, mais rapidamente há o cruzamento entre as linhas entre C original e C adquirido (Figura 8). Ou seja, o C adquirido passa a ter maior expressão no C total do solo. Nos pastejos a 30 e 40 cm, e SP, esse cruzamento ocorrerá no 44^o ano, enquanto que no pastejo a 10 cm, isso somente ocorrerá no 56^o ano, tendo valor intermediário (50 anos) no pastejo a 20 cm.

Todos os tratamentos obtiveram balanço positivo de CO, em relação a 2001, que variou de 1,3 a 4,06 Mg ha⁻¹ (Tabela 2). Nicoloso et al. (2008), avaliando a frequência de pastejo, relata que o solo só atua como dreno de C quando não há pastejo, ou se esse ocorre com frequência de 28 dias (o que equivaleria a um pastejo moderado). Para manter os estoques de CO na condição inicial do experimento, seria necessário aportar 3,15 Mg de C ha⁻¹ ano⁻¹, conforme estimado pela Equação 8. Todos os tratamentos apresentaram adições acima do necessário para manter esses estoques de CO (Tabela 2). Esta quantidade mínima é influenciada tanto pelo método de preparo quanto pelo sistema de rotação de culturas. O valor encontrado foi baixo devido ao baixo K₂ e alto K₁, porém, semelhante aos de Vieira (2007) e Lovato et al. (2004), em Argissolo, que estimaram quantidades de 3,7 e 4,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, e de Campos (2006), em Latossolo, com 3,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Bayer et al. (2006a) ressaltam a importância de adicionar ao solo, pelo menos, 3,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, em condições de plantio direto. Em um SIPA, em plantio direto, Nicoloso et al. (2008) também encontraram quantidade semelhante, de 4,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Sistemas de cultivo onde não é feito o revolvimento do solo, como o SPD, têm menor necessidade de aporte de resíduos do que o preparo convencional para manter os estoques de CO. Quando houve o revolvimento de solo, Lovato et al. (2004) determinaram que a adição anual de carbono requerida para manter os estoques num Argissolo são 8,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Já, em Latossolo sem revolvimento, como o do presente experimento, essa quantidade é de apenas 4,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Campos, 2006). Isso se deve à grande proteção física que a matéria orgânica de solos argilosos apresenta. Estes solos perdem menos MOS quando submetido ao preparo convencional, e necessitam menor adição para manter os estoques (Bayer, 1996).

No experimento em questão, são utilizadas apenas espécies de metabolismo C3, tanto no inverno, como no verão. Seria interessante então, não apenas fazer sucessão de culturas de famílias diferentes (gramíneas e leguminosas), mas também de metabolismo diferente. Ao inserir a cultura do milho em tal sistema produtivo, iria promover uma ciclagem diferenciada de nutrientes, um alto aporte de resíduo e uma incorporação maior de carbono, visto que espécies C4 são mais eficientes na captação de CO₂ (Wang et al., 2014). Além disso, o resíduo aportado seria de mais lenta decomposição, pois a relação C/N da soja é de 16:1 (Spagnollo et al., 2002), enquanto a do milho é de 76:1 (Bertol et al., 2004). Isso aumentará o tempo de permanência desses resíduos do solo, não apenas contribuindo para o aumento nos estoques de carbono, como também pelo benefício da presença da palha sobre o solo, na sua proteção contra o impacto das gotas de chuva e da enxurrada (Silva et al., 2012).

O efeito da falta de rotação de culturas só não é tão perceptível devido à textura do solo, a qual confere maior proteção física à matéria orgânica. Em um solo mais frágil, como o Argissolo, Nicoloso et al. (2008) observaram que, em SIPA sem rotação com milho, haveria balanço negativo de carbono, mesmo em condições de pastejo moderado.

6. CONCLUSÕES

Os estoques de carbono orgânico não diferiram entre as intensidades de pastejo, sendo menores do que a mata nativa, tomada como referência.

Os coeficientes de humificação e de perda da matéria orgânica do solo para o sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte em plantio direto, em Latossolo Vermelho distroférico argiloso, no subtropical brasileiro, se encontram dentro da faixa reportada na literatura para a condição edafoclimática e sistema de cultivo.

Sistemas integrados de produção de soja em plantio direto e bovinos de corte apresentam balanço positivo de carbono, independentemente da intensidade de pastejo adotada no inverno no Latossolo utilizado.

Predições do modelo unicompartmental indicam que os sistemas mais intensivos de pastejo (10 e 20 cm de altura) não conseguem chegar aos estoques da mata nativa ao longo do tempo. Já os sistemas de pastejo com intensidade moderada (30 e 40 cm de altura) e sem pastejo apresentam potencial de sequestro de carbono suficiente para se igualar à mata nativa, desde que os coeficientes de humificação e de perda da matéria orgânica do solo não mudem com o passar do tempo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O entendimento da dinâmica da matéria orgânica passa pela compreensão de seus compartimentos, seus fluxos e relações. O binômio pastagem/soja, apesar de aportar pequena quantidade de palha ao sistema (diferentemente de rotações que incluem milho), ainda assim, é suficiente para manter positivo o balanço de carbono no solo.

O efeito nos estoques totais de carbono não é muito pronunciado, porque este solo argiloso oxidico apresenta grande proteção física. No entanto, quando se pensa num período maior de tempo, até maior do que o tempo de vida de um ser humano, essa diferença pode ser expressiva.

Por fim, quando se trata de avaliações de longo prazo, é interessante fazer projeções para, com base no que já ocorreu poder estimar como será no futuro. O modelo de predição unicompartmental é uma ferramenta simples de usar, mas de difícil verificação. Com o passar do tempo, a proporção entre a matéria orgânica lábil e a não-lábil muda e, com isso, também irá alterar as taxas de decomposição da MOS. Por outro lado, com a evolução do sistema haverá um aumento na agregação do solo, o que diminuiria essa decomposição. Assim, se torna difícil prever como será a mudança que ocorrerá na taxa de perda de matéria orgânica. As taxas encontradas refletem apenas uma condição específica na evolução do sistema, e as predições podem não se concretizar.

8. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. A. et al. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, Lismore, v. 31, p. 1-9, 2015.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C. Revised carbon sequestration rates in tropical and subtropical soils under no-tillage in Brazil. In: CONSERVATION AGRICULTURE CARBON OFFSET CONSULTATION, 1., 2008, West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: CTIC, 2008. p.1-7.
- AMADO, T. J. C.; ELTZ, F. L. F. Plantio direto na palha – Rumo à sustentabilidade agrícola nos trópicos. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 49-66, 2003.
- ANDRIULO, A. E.; GALANTINI, J. A. Wheat-soybean double cropping over 13 years in the argentinean pampas; organic matter dynamics and quality. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 12., 1993, Salamanca. **Proceedings...** Salamanca: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, 1993. p. 161-170.
- ANDRIULO, A. E.; MARY, B.; GUERIF, J. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. **Agronomic**, Paris, v. 19, p. 365-377, 1999.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 221-278, 2013.
- ASSMANN, J. M. **Estoque de carbono e nitrogênio no solo e ciclagem de nutrientes em sistema de integração soja-bovinos de corte em plantio direto de longa duração**. 2013. 151 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in Southern Brazil.

- Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 52-59, 2014.
- BALBINOT JÚNIOR, A. A. et al. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 1925-1933, 2009.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Maize root-derived soil organic matter estimated by natural ^{13}C abundance. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 24, p. 97-101, 1992.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 28, p. 1261-1263, 1996.
- BÁRBACENAS-MORENO, G. et al. Adaptation of soil microbial communities to temperature: comparison of fungi and bacteria in a laboratory experiment. **Global Change Biology**, Illinois, v. 15, p. 2950-2957, 2009.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 241 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 217-226, 2006a.
- BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 677-683, 2004.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006b.
- BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em Ciências do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 55-118, 2011.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 105-112, 1997.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008, p. 7-18.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO_2 . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 599-607, 2000.
- BELAN, L. L. et al. Dinâmica entre temperaturas do ar e do solo sob duas condições de cobertura. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 11, p. 147-154, 2013.

- BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 111, p. 1-12, 2012.
- BERTOL, I.; LEITE, D.; ZOLDAN JR., W. A. Decomposição do resíduo de milho e variáveis relacionadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 369-375, 2004.
- BIRCHAM, J. S. **Herbage growth and utilization under continuous stocking management**. 1981. 381 f. Thesis (Ph.D) – University of Edinburgh, Edinburgh, 1981.
- BODDEY, R. M. et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Illinois, v. 16, p. 784-795, 2010.
- BOENI, M. et al. Organic matter composition in density fractions of Cerrado Ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 80-86, 2014.
- BOLINDER, M. A. et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 215, p. 85-91, 1999.
- BRAZ, S. P. et al. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 914-928, 2013.
- BRIEDIS, C. et al. Particulate soil organic carbon and stratification ratio increases in response to crop residue decomposition under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1483-1490, 2012.
- BRUN, E. J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus Taeda* e *P. elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul**. 2008. 118 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em silvicultura, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- CAMPOS, B. H. C. **Dinâmica do carbono em Latossolo vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- CAMPOS, B. H. C. et al. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 805-817, 2011.
- CARVALHO, A. M. **Carbono no solo e emissões de gases de efeito estufa**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 1 p.
- CARVALHO, P. C. F. et al. **Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil**. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2011. 60 p.
- CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **Sistema plantio direto no sul do Brasil**: Fatores que promoveram a evolução do sistema e desenvolvimento de máquinas agrícolas. Londrina: FAO/IAPAR, 2008. 100 p.

- CEMETRS – CONSELHO ESTADUAL DE METEOROLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas climático do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, [S.d.]. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS>>. Acesso em: 19 mai. 2015.
- CERRI, C. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar**. 1986. 197 f. Tese (Livre docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- CHÁVEZ, L. F. et al. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 46, p. 1254-1261, 2011.
- CHOUDHURY, S. G. et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice–wheat cropping system under reclaimed sodic soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 76-83, 2014.
- COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In: EVALUATION of soil organic matter models using existing long-term datasets. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. p. 237-246.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira – grãos – safra 2013/2014 – décimo levantamento – julho / 2014**. Disponível em: <<http://zip.net/bxqPLd>>. Acesso em: 17 ago. 2014.
- CONANT, R. T. et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, Illinois, v. 17, p. 3392-3404, 2011.
- CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K.; ELIOTT, E. T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecological Applications**, Ithaca, v. 11, p. 343-355, 2001.
- CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.
- CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, p. 40-47, 2013.
- CONTE, O. et al. Relação entre resistência mecânica do solo à penetração e força de tração demandada por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras, em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 730-739, 2008.
- CONTE, O. et al. Soil disturbance index as an indicator of seed drill efficiency in no-tillage agrosystems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 114, p. 37-42, 2011.
- CORSI, S. et al. **Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A literature review**. Roma: FAO, 2012. 89 p.
- COSTA, S. E. V. G. A. **Intervalo hídrico ótimo no solo e estado hídrico das plantas em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto**.

2014. 226 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CQFS RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2004. 400 p.
- DALAL, R. C.; MAYER, R. J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Lismore, v. 24, p. 281-292, 1986.
- DEURER, M. et al. Can minor compaction increase soil carbon sequestration? A case study in a soil under a wheel-track in an orchard. **Geoderma**, Amsterdam, v. 183-184, p. 74-79, 2012.
- DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 268, p. 319-328, 2005.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 225 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 192-194, 1993.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.
- FELTRE, R. **Química Geral**. 6 ed. São Paulo: Editora Moderna, 2004. v.2 – Físico-química. 418 p.
- FERREIRA, E. V. O. et al. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 33, p. 1675-1684, 2009.
- FIDELIS, R. R. et al. Alguns aspectos do plantio direto para a cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 19, p. 23-31, 2003.
- FLORES, J. P. C. et al. Atributos químicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto com aplicação superficial de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2385-2396, 2008.
- FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KASSAM, A. **Overview of the global spread of conservation agriculture**. Field Actions Science Reports, Special Issue, 6, 2012. Disponível em: <<http://factsreports.revues.org/1941>>. Acesso em: 19 mai. 2015.

- FURLANI, C. E. A. et al. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 375-380, 2008.
- GARCIA-PRÉCHAC, F. et al. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p. 1-13, 2004.
- GOLCHIN, A. et al. Soil structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, Lismore, v. 32, p. 1043-1068, 1994.
- GORDON, W. S.; JACKSON, R. B. Nutrient concentrations in fine roots. **Ecology**, Washington, v. 81, p. 275-280, 2000.
- GOULART, S. L. et al. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão [*Stryphnodendron adstringens* Coville] de bioma cerrado. **Cerne**, Lavras, v. 18, p. 59-66, 2012.
- GOUVELLO, C. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Brasília: Banco Mundial, 2010. 278 p.
- GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J. Organic matter accumulation and fertilizer-induced acidification Interact to affect soil microbial and enzyme activity on a long term sugarcane management experiment. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 41, p. 249-256, 2005.
- GREGORICH, E. G.; ELLERT, B. H.; MONREAL, C. M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ¹³C abundance. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 161-167, 1995.
- HARPER, R. J.; TIBBETT, M. The hidden organic carbon in deep mineral soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 368, p. 641-648, 2013.
- HECKLER, J. C.; SALTON, J. C. **Palha**: Fundamento do sistema plantio direto. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 26 p.
- HÉNIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 15, p. 161-172, 1945.
- HERRERO, M. et al. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. **Science**, New York, v. 327, p. 822-825, 2010.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change: The Scientific Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 375 p.
- JANSSEN, B. H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of "Young" soil organic matter. **Plant and Soil**, The Hague, v. 76, p. 297-304, 1984.
- JASTROW, J. D.; MILLER, R. M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. In: LAL, R. et al. **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 207-223.
- JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. **Soil Science**, Baltimore, v. 123, p. 298-305, 1977.

- KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 141, p. 184-192, 2011.
- KERR, R. A. Rising global temperature, rising uncertainty. **Science**, New York, v. 292, p. 192-194, 2001.
- KIRKBY, C. A. et al. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 68, p. 402-409, 2014.
- KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Frankfurt, v. 15, p. 259-263, 2006.
- KRULL, E. S.; BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for Modelling carbon turnover. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, p. 207-222, 2003.
- LAL, R. Crop residues and soil carbon. In: CONSERVATION AGRICULTURE CARBON OFFSET CONSULTATION, 1., 2008, West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: CTIC, 2008. p.1-7.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p. 1-22, 2004.
- LARSON, W. E. et al. Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 204-208, 1972.
- LOBELL, D. B.; TEBALDI, C. Getting caught with our plants down: the risks of a global crop yield slowdown from climate trends in the next two decades. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 9, p. 1-8, 2014.
- LOPES, M. L. T. et al. Sistema de integração lavoura-pecuária: efeito do manejo da altura de pastos de aveia-preta e azevém anual sobre o rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 1499-1506, 2009.
- LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 175-187, 2004.
- LUNARDI, R. et al. Rendimento de soja em sistema de integração lavoura-pecuária: efeito de métodos e intensidades de pastejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 795-801, 2008.
- MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.
- MARTHA JÚNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1117-1126, 2011.
- MARTINS, A. P. et al. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 141-149, 2014a.

- MARTINS, A. P. et al. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18-28, 2014b.
- MAZURANA, M. et al. Estoque de carbono e atividade microbiana em sistema de plantio direto consolidado no Sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 36, p. 288-296, 2013.
- MAZZILLI, S. R. et al. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 85, p. 22-30, 2015.
- MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C. Modelagem matemática e simulação da dinâmica da matéria orgânica do Solo. In: DINÂMICA da matéria orgânica em sistemas conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 75-106.
- METHERELL, A. K. et al. **Century**: soil organic matter model environment. Technical Documentation. Agroecosystem Version 4.0. Fort Collins: USDA-ARS, 1994. 123 p. (Great Plains System Research Unit. Technical Report, 4).
- MEZZALIRA, J. C. **O manejo do pastejo em ambientes pastoris heterogêneos**: comportamento ingestivo e produção animal em distintas ofertas de forragem. 2009. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de sistemas de culturas adaptadas à produtividade, conservação e recuperação de solos. In: MONIZ, A. (Coord.) **A responsabilidade social da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 109-116.
- MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solos e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 209-248, 2003.
- MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 4-9, 2014.
- MOREIRA, W. H. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 389-400, 2012.
- NICHOLS, E. et al. Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. **Biological conservation**, Amsterdam, v. 141, p. 1461-1474, 2008.
- NICOLOSO, R. S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- NICOLOSO, R. S. **Estoques e mecanismos de estabilização do carbono orgânico do solo em agroecossistemas de clima temperado e subtropical**. 2009. 107 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em

- Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- NICOLOSO, R. S. et al. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2425-2433, 2008.
- OENEMA, O. et al. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, Ithaca, v. 72, p. 51-65, 2005.
- OLIVEIRA, M. W. et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2359-2362, 1999.
- PARTON, W. J. et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1173-1179, 1987.
- PAUSTIAN, K.; PARTON, W. J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 476-488, 1992.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Chemical and mineralogical characteristics of selected acid soils of the state of Paraná, Brazil. **Turrialba**, San Jose, v. 35, p. 131-139, 1985.
- PEREIRA, M. W. G.; ARÊDES, A. F.; TEIXEIRA, E. C. Avaliação econômica do cultivo de trigo dos Estados do Rio Grande do Sul e Paraná. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 5, p. 591-610, 2007.
- PES, L. Z. et al. The primary sources of carbon loss during the crop-establishment period in a subtropical Oxisol under contrasting tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 163-171, 2011.
- PÖTTKER, D. **Efeito do tipo de solo, tempo de cultivo e da calagem sobre a mineralização da matéria orgânica em solos do Rio Grande do Sul**. 1977. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.
- RATHMANN, R. et al. Diversificação produtiva e as possibilidades de desenvolvimento: um estudo da fruticultura na região da Campanha no RS. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, p. 325-354, 2008.
- REES, R. M. et al. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 128, p. 130-154, 2005.
- REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, M. J. The effect of fall tillage method on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 1237-1243, 1993.
- ROSCOE, R. et al. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 103, p. 185-202, 2001.
- ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: **DINÂMICA da matéria orgânica em sistemas**

conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.

- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 28., 2000, Santa Maria. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2000/2001**. Santa Maria: UFSM-CCR-Departamento de Defesa Fitossanitária, 2000. 148 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 29., 2001, Porto Alegre. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2001/2002**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2001. 138p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 30., Cruz Alta, 2002. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, 2002/2003**. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2002. 140 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 31, Porto Alegre, 2003. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2003/04**. UFRGS, Porto Alegre, 2003. 137 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 32., 2004. Passo Fundo. **Indicações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2004/2005**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 172 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 33., 2005, Passo Fundo. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2005/06**. Passo Fundo: UPF, 2005. 157 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 34., 2006, Pelotas. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2006/07**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 237 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 35., 2007, Santa Maria. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2007/2008**. Santa Maria: UFSM-CCR, 2007. 201 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 36., 2008, Porto Alegre. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2008/2009**. Porto Alegre: Fepagro, 2008. 137 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 37, 2009, Porto Alegre. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2009/2010**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 144 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2010/11 e 2011/12**. Cruz Alta: Fundacep Fecotrig, 2010. 168 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 39., 2012, Cruz Alta. **Recomendações técnicas para a cultura de soja no Rio**

- Grande do Sul e Santa Catarina 2012/13 e 2013/14.** Passo Fundo: Embrapa Trigo e Apassul, 2012. 142 p.
- RPSRS - REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 40., 2014, Pelotas. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2014/15 e 2015/16.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. 124 p.
- SÁ, J. C. M. Gerenciamento da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto. In: CURSO de Atualização em Fertilidade do Solo. Passo Fundo, RS. 2005.
- SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1349-1356, 2011.
- SANCHEZ, P. A. Soil organic matter. In: SANCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the tropics.** New York: John Wiley, 1976. p. 162-183.
- SANCHEZ, P. A.; GICHURU, M. P.; KATZ, L. B. Organic matter in major soils of the tropical and temperate region. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 12., 1982, New Dehli. **Proceedings...** New Dehli: INSS, 1982. p. 99-114.
- SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. (Ed) **Myths and Science of Soils in the Tropics.** Madison: SSSA, 1992. p. 35-46.
- SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 85-91, 2000.
- SELMANTS, P. C. et al. Ecosystem carbon storage does not vary with mean annual temperature in Hawaiian tropical montane wet forests. **Global Change Biology**, Illinois, v. 20, p. 2927-2937, 2014.
- SHI, X. M. et al. Grazing exclusion decreases soil organic C storage at an alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 57, p. 183-187, 2013.
- SILVA NETO, L. F. et al. Óxidos de ferro em latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1873-1881, 2008.
- SILVA, E. F. et al. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1321-1331, 2011a.
- SILVA, F. D. **Distribuição espacial e temporal de placas de esterco e produtividade da soja em sistema de integração soja-bovinos de corte.** 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- SILVA, F. D. et al. Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop–livestock systems under no-till. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 84-91, 2014.

- SILVA, G. R. V. et al. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 963-970, 2012.
- SILVA, I. R. et al. **Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto**: uma questão estratégia para a manutenção da sustentabilidade. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Boletim Informativo, v. 29, p. 10-20, 2004.
- SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 541-547, 1994.
- SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa-CNPAC, 1997. p. 467-524.
- SILVA, M. A. S. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 329-337, 2006.
- SILVA, R. F. et al. Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1277-1283, 2011b.
- SILVEIRA, P. M.; CUNHA, A. A. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um Latossolo submetido a sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1325-1332, 2002.
- SMITH, P. et al. Evaluation and comparison of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments, **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, p. 153-225, 1997.
- SOUSSANA, J. F. et al. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. **Soil Use and Management**, Lismore, v. 20, p. 219-230, 2004.
- SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 9-17, 2014.
- SOUZA, E. D. et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 74-88, 2010a.
- SOUZA, E. D. et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1829-1836, 2009.
- SOUZA, E. D. et al. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1365-1374, 2010b.
- SOUZA, E. D. et al. Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 139, p. 28-36, 2014.

- SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 77-86, 1998.
- SPAGNOLLO, E. et al. Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 417-423, 2002.
- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2 ed. New York: J. Willey, 1994. 496 p.
- TOMAZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em latossolos do cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 2008. 106 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p.
- TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e uréia-¹⁵N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 1375-1385, 1995.
- VAN VEEN, J. A.; PAUL, E. A. Organic carbon dynamics in grassland soil. I. Background information and computer simulation. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 61, p. 185-201, 1981.
- VAN WAMBEKE, A. **Soils of the Tropics - Properties and appraisal**. New York: McGraw-Hill, 1992. 343 p.
- VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W. No-tillage increases soil profile carbon and nitrogen under long-term rainfed cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 114, p. 28-36, 2011.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 743-755, 2009.
- VIEIRA, F. C. B. **Estoques e labilidade da matéria orgânica e acidificação de um Argissolo sob plantio direto afetados por sistemas de culturas e adubação nitrogenada**. 2007. 124 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- VIEIRA, F. C. B. et al. Building up organic matter in a subtropical paleudult under legume cover-crop-based rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 1699-1706, 2009.
- WANG, Y.; LONG, S. P.; ZHU, X. G. Elements required for an efficient NADP-malic enzyme type C4 photosynthesis. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 164, p. 2231-2246, 2014.
- YANG, J.; GAO, W.; REN, S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon

and total nitrogen in fluvo-aquic soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 151, p. 67-74, 2015.

ZANATTA, J. A.; SALTON, J. C. Soil carbon sequestration affected by no-tillage and integrated crop-livestock systems in Midwestern Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: WCSC, 2010. p.1-6.

9. APÊNDICES

Apêndice 1. Teores de carbono orgânico e nitrogênio no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto

Tratamento	Profundidade ----- cm -----	Carbono orgânico			Nitrogênio		
		----- g kg ⁻¹ -----					
10 cm	0 - 5	24,4	27,0	30,7	2,20	2,44	2,73
	5 - 10	21,6	19,8	21,6	1,89	1,80	1,95
	10 - 15	16,0	14,0	15,6	1,32	1,19	1,35
	15 - 20	16,6	13,4	15,4	1,35	1,10	1,25
20 cm	0 - 5	26,5	28,2	31,0	2,46	2,60	2,77
	5 - 10	18,5	19,7	21,9	1,69	1,79	1,98
	10 - 15	14,5	15,8	17,6	1,26	1,35	1,54
	15 - 20	14,5	15,2	15,7	1,15	1,26	1,32
30 cm	0 - 5	30,4	30,6	28,8	2,73	2,73	2,69
	5 - 10	21,8	21,1	20,7	1,96	1,95	1,80
	10 - 15	16,5	15,8	16,9	1,45	1,36	1,41
	15 - 20	15,2	14,9	15,8	1,24	1,26	1,24
40 cm	0 - 5	24,5	26,1	30,3	2,24	2,32	2,83
	5 - 10	22,0	23,6	23,1	1,97	2,17	2,10
	10 - 15	17,8	17,3	17,2	1,51	1,60	1,45
	15 - 20	18,0	14,2	14,2	1,43	1,25	1,17
Sem Pastejo	0 - 5	34,0	29,8	31,7	3,18	2,82	2,92
	5 - 10	18,4	20,4	20,1	1,72	1,88	1,84
	10 - 15	15,7	17,4	16,4	1,29	1,54	1,39
	15 - 20	13,3	15,7	15,0	1,09	1,30	1,26
Mata	0 - 5	44,4	45,4	36,0	4,15	4,31	3,43
	5 - 10	25,7	26,0	25,2	2,37	2,42	2,28
	10 - 15	21,2	21,5	23,1	1,89	1,90	1,95
	15 - 20	19,0	19,4	19,1	1,64	1,63	1,53

Apêndice 2. Estoques de carbono orgânico e nitrogênio, na camada de 0-20 cm, no início (2001) e após 13 anos em sistema integrado de produção de soja-bovinos de corte, submetido a diferentes alturas de manejo do pasto, em plantio direto

Tratamento	Carbono orgânico			Nitrogênio		
	----- Mg ha ⁻¹ -----			-----		
10 cm	52,2	49,2	55,2	4,49	4,33	4,83
20 cm	49,1	52,3	57,2	4,35	4,64	5,04
30 cm	55,6	54,7	54,6	4,89	4,84	4,73
40 cm	54,8	53,9	56,2	4,76	4,88	5,00
Sem Pastejo	53,8	55,2	55,1	4,80	5,00	4,90
Mata	73,0	74,3	68,6	6,65	6,78	6,09

10. ANEXO

Anexo 1. Estimativa da taxa de adição anual de carbono em diferentes intensidades de pastejo em um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração soja-pecuária de corte em plantio direto e intensidades de pastejo

Tratamento	Parte aérea pastagem	Raízes da pastagem	Urina + esterco	Parte aérea da soja	Raízes da soja	Total
Resíduo de plantas e animais						
----- Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----						
10 cm	1,40	1,40	1,22	2,38	1,72	8,12
20 cm	2,98	1,30	0,81	2,28	1,91	9,28
30 cm	4,74	1,20	0,61	2,83	1,70	11,07
40 cm	5,80	1,00	0,46	2,02	1,69	10,97
Sem pastejo	5,50	0,70	...	2,40	2,22	10,82
Adição de carbono						
----- Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----						
10 cm	0,63	0,63	0,55	1,07	0,77	3,65
20 cm	1,34	0,59	0,36	1,03	0,86	4,18
30 cm	2,13	0,54	0,27	1,27	0,77	4,98
40 cm	2,61	0,45	0,21	0,91	0,76	4,94
Sem pastejo	2,48	0,32	...	1,08	1,00	4,87